

Nivells de radó en recintes tancats de la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer.



Treball de recerca de 3r cicle
Programa de doctorat de Física

Realitzat per: ***Victòria Moreno Baltà***
Sota la direcció de la Dra. Carme Baixeras i
el Dr. Lluís Font.

Bellaterra, Octubre 2006.

A qui m'ha estimat sempre
i ara viu en el meu cor.

Agraïments

Desitjo expressar el meu sincer agraïment a les següents persones:

A la Dra. Carme Baixeras i al Dr. Lluís Font, directors d'aquest treball de recerca, per haver-me donat l'oportunitat de formar part del seu grup d'investigació i mostrar-me tot el seu entusiasme, paciència i dedicació durant la realització d'aquest treball i, sobretot, pel seu recolzament en els moments difícils.

Al Dr. Joan Bach per introduir-me al món de la Geologia, per la seva motivació en aquest projecte i per tot el seu ajut i paciència durant el transcurs de la campanya de mesura.

Als Drs. Francisco Fernández, Carles Domingo i Tayeb Bouassoule per haver-me acollit en el grup i proporcionar-me les seves opinions i diversitat de punts de vista i, sobretot al Dr. Khalil Amgarou, per tota la seva dedicació durant els meus primers mesos en el grup i ensenyar-me tot lo relacionat amb els detectors sòlids de traces nuclears.

A la meva companya Maria José per interessar-se per l'evolució de la campanya de mesura, ajudar-me en temes informàtics i en altres aspectes.

A la resta de companys del Grup de Física de les Radiacions: Xavier, Joan, Andreu, Maita, Raquel, Jordi, Sergi i a tota la gent de radioactivitat ambiental: Dr. Pere Masqué, Dr. Jordi García, Joan-Manel Bruach, Carolina, Elisabet, Núria, Ester, César, etc. pel bon ambient de treball i l'alegria que es respira en el grup.

A la gent de la UTPR per la seva paciència cada vegada que he utilitzat el búnker i la furgoneta del servei, i especialment a la Fermina, pels bons moments compartits a Huelva.

A l'Helena i el Marc per la seva amistat i ajuda en diferents moments de la campanya de mesura.

Al Dr. Arturo Vargas per permetre'm conèixer de més a prop el funcionament de la cambra de radó del Laboratori d'Estudis del Radó de l'INTE i pels seus bons consells relacionats amb el monitors de radó.

També voldria expressar el meu agraïment a totes les persones que han tingut l'amabilitat de col·laborar a la campanya de mesura del radó deixant-nos instal·lar els dosímetres a l'interior dels seus llocs de treball i habitatges i també a totes les persones dels diferents ajuntaments que ens han acompanyat a tots els recintes estudiats.

Aquest treball i tot el projecte que l'ha emmarcat han estat possibles gràcies a un convenir de recerca entre el CSN i la UAB.

Finalment, també voldria dedicar aquest treball a la meva mare, el meu Oriol i la resta de la meva família, sense l'amor dels quals aquest treball no hauria estat possible.

INTRODUCCIÓ	1
1. EL GAS RADÓ.....	5
1.1. INTERÈS RADIOLÒGIC DEL RADÓ.....	5
1.1.1. La Protecció Radiològica.....	5
1.1.2. Estatus del radó a Espanya.	8
1.1.3. Mesures del radó a Espanya i Catalunya.	9
1.2. CARACTERÍSTIQUES FÍSQUES I QUÍMIQUES DEL RADÓ.	11
1.2.1. Els isòtops del radó.....	12
1.2.2. Els descendents del radó.....	14
1.2.3. Quantitats i unitats especials.....	14
1.3. DINÀMICA DEL RADÓ.	15
1.3.1. Generació i emanació del radó.	15
1.3.2. Transport i exhalació del radó.	15
1.3.3. El radó en l'aire atmosfèric.....	16
1.3.4. El radó en recintes tancats.	17
1.4. APLICACIONS DEL RADÓ EN LES CIÈNCIES DE LA TERRA I EL MEDI AMBIENT.....	19
1.4.1. Predicció de terratrèmols i vigilància volcànica.	19
1.4.2. Prospecció d'urani i heli.	19
1.4.3. Explotació d'energia geotèrmica.	20
1.4.4. Traçador de processos ambientals.	20
1.4.5. Estudi de sistemes càrstics.....	21
2. LA DETECCIÓ DEL RADÓ.....	23
2.1. TIPUS DE MESURES.	23
2.2. TIPUS DE DETECTORS.	23
2.2.1. Tipus de detectors actius.....	24
2.2.2. Tipus de detectors passius.	25
2.3. ELS DETECTORS UTILITZATS.	26
2.3.1. Detector actiu: El monitor de radó PRASSI.	26
2.3.2. Detectors passius: Els detectors de Makrofol.	28
2.4. EL REVELATGE DELS DETECTORS SÒLIDS DE TRACES NUCLEARS (DSTN).	29
2.4.1. El revelatge electroquímic.	30
2.4.2. Paràmetres importants que influeixen en el revelatge dels DSTN.	30
2.5. EL REVELATGE ELECTROQUÍMIC UTILITZAT PELS DETECTORS DE MAKROFOL.	31
2.5.1. El sistema de revelatge.	31
2.5.2. Les condicions de revelatge utilitzades.	32
2.6. EL SISTEMA DE LECTURA I ANÀLISI DELS DETECTORS DE MAKROFOL.	32
3. MÈTODE EXPERIMENTAL.....	35
3.1. METODOLOGIA EMPRADA AMB EL MONITOR DE RADÓ PRASSI.....	35
3.2. METODOLOGIA EMPRADA AMB ELS DETECTORS DE MAKROFOL.....	36
3.2.1. Adquisició i emmagatzematge.....	36
3.2.2. Muntatge dels dosímetres.	36
3.2.3. Revelatge del detectors.	37

3.2.4. Lectura i anàlisi dels detectors.....	39
3.3. CONTROL DE QUALITAT DE LA METODOLOGIA EMPRADA AMB ELS DETECTORS DE MAKROFOL.....	40
3.3.1. Sistema de revelatge.....	40
3.3.2. La velocitat d'atac superficial.....	42
3.3.3. Sistema de Lectura.....	44
3.4. DETERMINACIÓ DE LA CONCENTRACIÓ DE RADÓ I LA INCERTESA ASSOCIADA A LES MESURES AMB ELS DSTN.....	47
3.4.1. Determinació de la densitat de traces de fons i de trànsit.....	47
3.4.2. Determinació de la incertesa sistemàtica del mètode de mesura.....	50
3.4.3. Càlcul de la densitat de traces neta a partir d'un sòl detector exposat.....	51
3.4.4. Càlcul de la concentració de radó.....	52
3.4.5. Límit inferior de detecció.....	55
3.5. CALIBRATGE DELS DETECTORS DE RADÓ.....	55
3.5.1. Detector actiu.....	55
3.5.2. Detectors passius.....	55
3.6. INTERCOMPARACIONS DELS DETECTORS DE RADÓ.....	57
3.6.1. Detector actiu.....	57
3.6.2. Detectors passius.....	58
3.7. COMPARACIÓ ENTRE FILTRES I MESURES AMB DIFERENTS HUMITATS.....	61
4. LA CAMPANYA A LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA I LA FALLA D'AMER. ...	65
4.1. LA CAMPANYA PRELIMINAR D'OLOT.....	65
4.2. INTERÈS GEOLÒGIC DE LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA I LA FALLA D'AMER.....	66
4.2.1. El marc geològic.....	66
4.2.2. Tipus de materials.....	68
4.2.3. Permeabilitats.....	72
4.3. MOTIVACIÓ I OBJECTIUS DE LA CAMPANYA.....	73
4.4. DISSENY DE LA CAMPANYA.....	74
4.4.1. Selecció dels recintes.....	74
4.4.2. Distribució dels dosímetres i localització del seu emplaçament.....	78
4.4.3. Períodes d'exposició i criteri de recollida dels dosímetres.....	81
5. RESULTATS DE LA CAMPANYA DE MESURA.....	83
5.1. INTERÈS RADIOLÒGIC DELS NIVELLS DE RADÓ.....	83
5.1.1. Comparació amb els resultats de la campanya preliminar d'Olot.....	84
5.1.2. Nivells de radó en llocs de treball i habitatges.....	84
5.1.3. Influència dels factors estructurals dels recintes.....	86
5.2. ESTUDIS PARTICULARS.....	87
5.2.1. El recinte 42.....	88
5.2.2. El recinte 8.....	92
5.3. INTERÈS GEOFÍSIC DELS NIVELLS DE RADÓ.....	94
5.3.1. Estudi dels nivells de radó en funció del tipus de material del sòl i el subsòl.....	94
5.3.2. Estudi dels nivells de radó en funció de la distància a la Falla d'Amer.....	96

5.3.3. Estudi de les variacions estacionals de la concentració de radó.	99
5.3.4. Discussió dels resultats des del punt de vista de la Geofísica.	105
CONCLUSIONS.	109
PERSPECTIVES DE TREBALL FUTUR.	115
ANNEX A: UNITATS I QUANTITATS ESPECIALS.	117
ANNEX B: RESULTATS DE LES INTERCOMPARACIONS.	119
ANNEX C: MODELS DE CARTES ENTREGADES ALS COL·LABORADORS.	123
ANNEX D: TAULES DE LA CAMPANYA DE MESURA.	125
GLOSSARI D'ACRÒNIMS.	137
REFERÈNCIES.	139

Introducció.

El present treball ha estat realitzat en el Grup de Física de les Radiacions (GFR) del Departament de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en el marc del projecte d'investigació "Estudi del risc associat a la inhalació de descendents el radó en diferents activitats laborals i en habitatges", finançat pel Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) espanyol.

Per dur a terme els objectius d'aquest projecte s'ha realitzat una extensa campanya de mesures a diferents recintes tancats de Catalunya. Molts d'aquests recintes són llocs de treball subterranis distribuïts per tota la geografia catalana (mines en explotació, antigues mines que ara són museus, coves turístiques, el metro de Barcelona, alguns aparcaments subterranis d'aquesta ciutat, etc.) però la majoria dels recintes estudiats estan concentrats a la zona volcànica de la Garrotxa i a la falla d'Amer.

Aquest treball inclou una bona part de la metodologia utilitzada per dur a terme aquest projecte, però la descripció de la campanya de mesura i l'anàlisi dels resultats estan centrats en una part concreta de tot el projecte. Aquesta part és la que correspon a les zones de la Garrotxa i la falla d'Amer que, apart de tenir un cert interès des del punt de vista de la protecció radiològica, també esdevenen molt interessants des del punt de vista de la Geofísica. En aquestes zones és on es concentra el total dels habitatges particulars estudiats en el marc del projecte.

Els principals objectius d'aquest treball són els següents:

- **Control de qualitat del mètode de mesura.**

Abans d'iniciar les mesures de la concentració de radó a l'interior de recintes tancats es porta a terme un control de qualitat del mètode de mesura utilitzat pel GFR i s'incorporen algunes optimitzacions.

- **Calibratge dels sistemes de mesura i participació en intercomparacions.**

Degut a l'adquisició de nous materials i a l'ajust de les condicions de revelatge dels detectors de traces nuclears és necessari realitzar el calibratge d'aquest sistema de mesura. Al llarg de la campanya també es participa en diferents intercomparacions nacionals i internacionals per comprovar el factor de calibratge obtingut.

- **Disseny de la campanya de mesura.**

Aquest treball recull una descripció detallada de la campanya de mesura que s'ha dut a terme a la zona volcànica de La Garrotxa i la Falla d'Amer amb l'objectiu de determinar la concentració de radó a l'interior de recintes tancats en una zona d'interès geofísic i amb un cert interès radiològic.

- **Estudi de la importància dels resultats obtinguts a la campanya.**

Els resultats obtinguts a la campanya de mesura s'analitzen i es discuteixen des dels dos punts de vista esmentats.

Aquest treball està estructurat en els següents capítols:

1. El gas radó. Interès radiològic, característiques físico-químiques, dinàmica i aplicacions en les ciències naturals.

En aquest capítol es parla de forma general del gas radó. Es presenta l'evolució del seu interès des del punt de vista de la protecció radiològica, des del seu descobriment fins a l'actualitat. S'analitza quina és la situació respecte de la problemàtica del radó a l'estat espanyol i s'enuncien els principals estudis sobre el radó que s'han dut a terme a Espanya i sobretot a Catalunya. A continuació es descriuen les principals característiques físiques i químiques del gas radó, diferenciant entre els seus isòtops i parlant breument dels seus descendents. Després es fa referència a la dinàmica del radó, indicant els processos de generació, emanació, transport i exhalació que fan possible la presència d'aquest gas a l'atmosfera i a l'interior de recintes tancats. Finalment, es descriuen les principals aplicacions del gas radó en les Ciències de la Terra i el Medi Ambient.

2. La detecció del radó.

En primer lloc es fa referència, de forma general, a les diferents tècniques de mesura de la concentració de radó present a l'aire, distingint entre els diferents tipus de detectors actius i passius. A continuació i amb més detall, es descriuen els detectors utilitzats pel GFR per mesurar el radó a l'interior de recintes tancats, posant especial atenció a tot el mètode de mesura relacionat amb els Detectors Sòlids de Traces Nuclears (DSTN), és a dir, als sistemes de revelatge electroquímic, lectura i anàlisi d'aquest tipus de detector.

3. Mètode experimental.

En aquest capítol es descriu la metodologia utilitzada per realitzar les mesures de la concentració de radó amb els DSTN i amb el monitor de radó PRASSI. A continuació es fa un estudi de la reproductibilitat dels resultats obtinguts amb els detectors de Makrofol per tal de controlar la qualitat de la metodologia emprada amb els sistemes de revelat, lectura i anàlisi d'imatges. Posteriorment es descriuen detalladament tots els càlculs i els procediments que han permès obtenir els valors de la concentració de radó amb aquests detectors, tal com l'estudi de la densitat de traces de fons, la determinació de la incertesa associada al mètode de mesura, el calibratge, les intercomparacions i altres estudis.

4. La campanya a la zona volcànica de la Garrotxa i la Falla d'Amer.

Aquest capítol fa referència a la campanya de mesura de la concentració de radó que s'ha dut a terme a l'interior de recintes tancats de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer. En primer lloc es presenten els diferents aspectes que van motivar la realització d'aquesta campanya de mesura: la campanya preliminar de l'any 2002 a Olot i l'interès des del punt de vista de la Geofísica de l'àrea de treball, amb una descripció detallada de la seva estructura geològica i dels diversos tipus de materials presents en el sòl de la zona. A continuació s'indiquen els diferents objectius de la campanya

de mesura i finalment es descriu de forma detallada tot el seu disseny: localització dels recintes, la distribució dels dosímetres, els períodes d'exposició i els criteris per la seva recollida.

5. Resultats de la campanya de mesura.

En aquest capítol es presenten tots els resultats de la concentració de radó en els recintes estudiats a la campanya de mesura de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer. L'anàlisi de tots els resultats es fa des de dos punts vista diferents: En primer lloc des del punt de vista de l'interès radiològic del radó i en segon lloc des del punt de vista de la Geofísica. Primer es comparen els nivells de radó amb els obtinguts a altres campanyes de mesura de Catalunya, a altres zones volcàniques i a la campanya preliminar d'Olot. Després es fa una distinció dels recintes entre llocs de treballs i habitatges per tal comparar els nivells de radó obtinguts amb els nivells d'acció recomanats pels diferents organismes europeus i internacionals relacionats amb la Protecció Radiològica. S'analitza la influència d'alguns factors estructurals sobre els nivells de radó dels recintes estudiats. Finalment s'estudia en més detall els nivells de radó i l'efecte de la ventilació en un parell de llocs de treball. Des del punt de vista geofísic s'analitzen els resultats tenint en compte el tipus de material del sòl i el subsòl sobre el que estan construïts els recintes i s'estudia la influència de la falla d'Amer. A partir dels resultats d'uns recintes concrets, també s'estudia la variació estacional de la concentració de radó. Finalment es presenta una discussió dels resultats d'aquests estudis des del punt de vista de la Geofísica.

Finalment es presenten totes les conclusions a les que s'ha arribat amb la realització d'aquest treball, així com les perspectives de treball futur.

1. El gas radó.

1.1. Interès radiològic del radó.

Molt abans del descobriment de la radioactivitat i dels seus efectes sobre l'organisme, alguns científics ja havien observat els efectes del radó sobre alguns col·lectius de persones sense ser-ne conscients. Al segle XVI ja es coneixia l'existència d'una malaltia anomenada “mal de muntanya” que afectava alguns treballadors de les mines de carbó de la regió muntanyosa de Bohèmia, en el centre d'Europa. Un científic anomenat Agrícola, l'any 1556, va escriure el primer tractat de prospecció relacionat amb l'explotació minera i la metal·lúrgia i va destacar l'alta incidència de malalties pulmonars mortals entre els treballadors de la mina de pechblenda de Joachimestal, a Txecoslovàquia. Encara havien de passar, però, més de tres segles perquè es pogués relacionar aquesta alta incidència de càncers amb l'existència a l'interior de les mines d'elevades concentracions d'un gas anomenat radó.

Becquerel va descobrir la radioactivitat l'any 1896, observant que les sals d'urani emetien unes radiacions que podien impressionar plaques fotogràfiques. Pierre i Marie Curie van descobrir el radi l'any 1898, i també van observar la presència d'un element gasós radioactiu. L'any 1900 Ernst Dorn va descobrir que aquest gas era el producte directe de la desintegració del radi i el va anomenar *Emanació de radi*. Des d'aleshores diferents científics, com Rutherford i Soddy a l'any 1903, van començar a estudiar les seves propietats físiques i químiques. L'any 1908 Ramsey i Gray el van anomenar *nitó*, el van aïllar, van determinar la seva densitat i van trobar que es tractava del més pesant dels gasos nobles existents a la natura. Amb els anys es va anar descobrint tota la cadena de desintegració de la que formava part aquest gas i l'any 1923 ja se'l va anomenar radó. Posteriorment, es va descobrir que el càncer pulmonar no era produït directament pel radó sinó per les successives desintegracions radioactives dels seus descendents de curt període de semidesintegració.

Fa tres dècades encara es creia que les altes concentracions de radó només es podien trobar a l'interior de mines, en alguns recintes situats a prop de residus industrials, en zones de minerals amb alts continguts en radi o en els recintes construïts utilitzant aquests tipus de materials. Estudis posteriors, realitzats en els països més desenvolupats, van demostrar que també es podien trobar altes concentracions en habitatges situats en regions amb un contingut normal de radi i, per tant, va créixer l'interès per estudiar el comportament del radó i dels seus descendents.

1.1.1. La Protecció Radiològica.

Inicialment, les fonts de radiació d'origen natural eren considerades com un fons ambiental de radiació al qual tothom estava exposat i que no era necessari controlar. Tots els esforços de control, guiats per la comunitat internacional i basats en les recomanacions de la Comissió Internacional de Protecció Radiològica (ICRP), només estaven dedicats a les fonts artificials, és a dir, al control de les dosis rebudes com a conseqüència de l'acció de l'home. Ara bé, el fet de descobrir que la contribució

més important a la dosi total de radiació rebuda pel públic en general era la deguda a la inhalació dels descendents de vida mitja curta del radó va fer augmentar la sensibilitat de la comunitat científica i de la societat en general davant el problema del radó, especialment durant les dues últimes dècades del segle passat. A la publicació 50 de la ICRP (ICRP, 1987) ja s'anunciava que, si bé el tabaquisme seguia sent la principal causa en general, una fracció significativa de la freqüència del càncer pulmonar, en varis països, podia ser atribuïda a l'exposició als descendents del radó en recintes tancats. A la publicació número 60 de la ICRP (ICRP, 1991) van aparèixer les primeres recomanacions relacionades amb el gas radó. Segons el Comitè Científic de les Nacions Unides pels Efectes de la Radiació Atòmica (UNSCEAR) el valor mig anual de la dosi eficaç equivalent deguda a les fonts artificials de radiació està entre 0.4 i 1 mSv mentre que la deguda a les fonts naturals és de 2.4 mSv, dels quals 1.2 mSv (50%) són deguts al radó i els seus descendents (UNSCEAR, 2000). A la **Figura 1.1** apareixen les contribucions relatives de les diferents fonts de radiació a la dosi total rebuda per la població en general. A la **Taula 1.1** apareixen les dosis anuals i els rangs típics procedents de les fonts artificials de radiació per individus del públic en general i a la **Taula 1.2** les corresponents a les fonts naturals de radiació. A la **Figura 1.2** apareix la contribució relativa deguda a les diferents fonts naturals de radiació a la dosi rebuda pel públic en general.

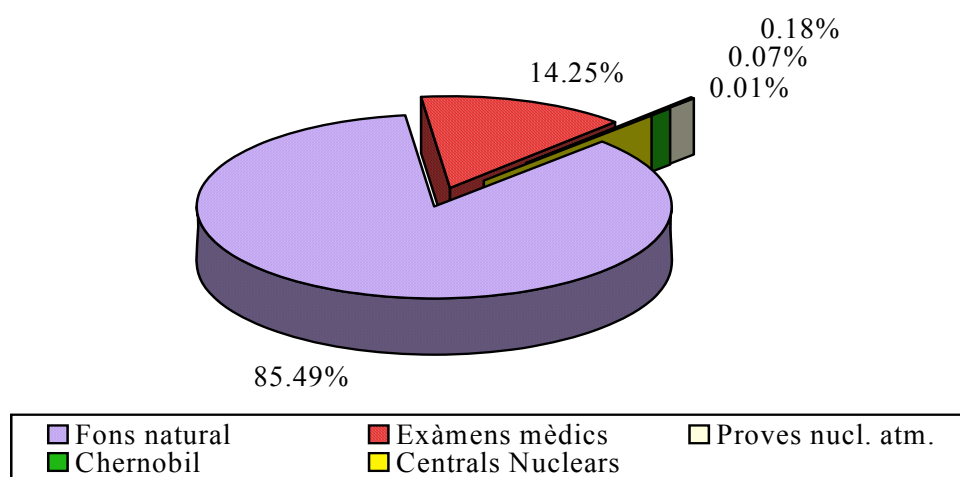


Figura 1.1. Contribució relativa de les diferents fonts de radiació a la dosi total rebuda pel públic en general.

Taula 1.1. Dosis anuals degudes a les fonts artificials de radiació per individus del públic en general (UNSCEAR, 2000).

Font	Dosis mSv/any	Rang típic (mSv/any)
Aplicacions mèdiques (diagnòstic)	0,4	0,04-10
Proves nuclears atmosfèriques	0,005	0,15 (1963)
Accident de Chernòbyl	0,002	0,04 (1986)
Producció d'energia nuclear	0,0002	
Total	0,4072	

Taula 1.2. Dosis anuals degudes a les fonts naturals de radiació per individus del públic en general (UNSCEAR, 2000).

Font	Dosis mSv/any	Rang típic mSv/any
Exposició externa		
Raigs còsmics	0,4	0,3-1,0
Raigs gamma de l'escorça terrestre	0,5	0,3-0,6
Exposició interna		
Radó (Inhalació)	1,2	0,2-10
Aigua i aliments (Ingestió)	0,3	0,2-0,8
Total	2,4	1-10

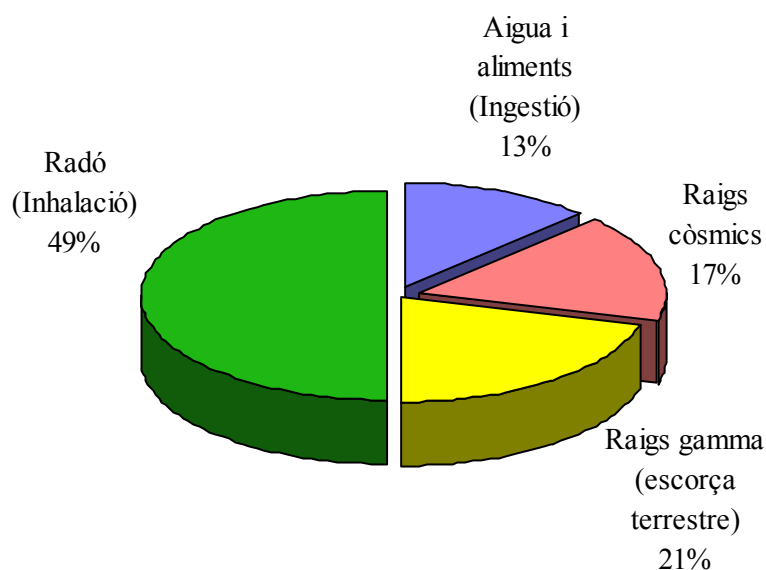


Figura 1.2. Contribució relativa de les diferents fonts de radiació natural a la dosi total rebuda pel públic en general.

El problema del gas radó afecta al conjunt de la població en general. A diferència de les altres fonts naturals de radiació el radó és la font que presenta una variabilitat més gran i amb la que es poden aplicar mètodes de mitigació amb més facilitat. Quan el radó, present a l'escorça terrestre, arriba a l'aire atmosfèric es difon ràpidament i això fa que les concentracions d'aquest gas siguin molt petites, en canvi, al entrar en un recinte tancat es pot acumular i la seva concentració pot arribar a ser bastant elevada. Els valors de la concentració de radó en recintes tancats poden variar molt d'una població a una altra i entre els diferents recintes d'una mateixa població, en funció dels hàbits de les persones i de les característiques estructurals i condicions ambientals dels diferents habitatges i llocs de treball. El tipus de terreny, els materials de construcció, les condicions de ventilació dels recintes, la procedència de l'aigua utilitzada, l'ús de productes energètics (carbó, petroli, gas...), etc. són els principals factors que produeixen diversos graus d'intensitat en l'impacte radiològic produït pel radó. El fet que puguin existir recintes on la concentració d'aquest gas sigui tant elevada que representi un risc per a les persones que hi viuen o hi treballen és el motiu que fa que continuï sent important realitzar estudis que permetin estimar la dosi deguda a aquest gas que rep la població i, en els casos que sigui possible, trobar mètodes de mitigació.

Quan el radó és inhalat té una probabilitat petita de desintegrar-se a l'interior dels pulmons abans de ser expulsat, degut al fet de ser un gas noble i a tenir una vida mitja relativament llarga (el seu període de semidesintegració és de 3.82 dies). En canvi, els seus descendents de vida mitja curta es poden dipositar fàcilment a les parets del sistema respiratori. Quan aquests es desintegren poden deixar tota l'energia de les seves emissions alfa al llarg del sistema respiratori, especialment als teixits bronquials, i produir un dany biològic important. L'estimació del risc radiològic associat a la inhalació dels descendents del radó s'ha dut a terme a través de dues grans vies d'investigació: la basada en els estudis epidemiològics i la que utilitza models dosimètrics del sistema respiratori. Els resultats obtinguts per ambdues vies no acaben de coincidir del tot i, per tant, continuen sent línies obertes d'investigació (Stidley i Samet, 1993; ICRP, 1994b).

S'ha observat que la concentració de radó a l'interior de recintes tancats pot experimentar variacions estacionals i diürnes importants. Aleshores, per dur a terme una estimació precisa de la dosi, a part de conèixer les fluctuacions temporals, també és necessari conèixer un conjunt de paràmetres que no són senzills de determinar, com són, el factor d'equilibri entre el radó i els seus descendents, la fracció lliure dels descendents i l'espectre dimensional de les partícules dels aerosols (Vargas et al., 2004). Degut a la complexitat per a controlar tots aquestes variables, quan es realitzen extenses campanyes de mesura només es porten a terme mesures de la concentració de radó de forma integrada durant períodes de temps llargs i després s'estimen les dosis assumint uns valors de referència dels paràmetres mediambientals. Aquest fet ha provocat que molts països hagin establert els nivells d'acció en termes de la concentració de radó anual i no en termes de dosis. Els valors més estesos es situen al voltant de 200-600 Bq m⁻³ en habitatges i 500-1500 Bq m⁻³ per llocs de treball. Aquests valors de concentració s'obtenen en aplicar uns factors de conversió, obtinguts segons els estudis epidemiològics utilitzats per la ICRP per dosis efectives de 3-10 mSv, i uns períodes d'exposició de 7000 hores a l'any per habitatges i de 2000 hores a l'any per llocs de treball. Assumint un factor d'equilibri de 0.4, comú en els habitatges, s'estima que la dosi efectiva per unitat d'exposició a gas radó per membres del públic és de 2.4 nSv per Bq m⁻³ h. Per fer una correcta estimació de la dosi en els llocs de treball i habitatges que tenen unes condicions ambientals significativament diferents a les de referència cal modificar adequadament els corresponents paràmetres.

La Comissió de les Comunitats Europees (CEC), a la recomanació relativa a la protecció de la població contra els perills de l'exposició al radó en l'interior d'edificis (CEC, 1990), recomana com a nivells d'acció una concentració de radó de 200 Bq m⁻³ pels habitatges de nova construcció i 400 Bq m⁻³ pels habitatges existents, considerant que cal prendre accions de remei simples en cas de que s'excedeixi aquest valor. Pel què respecta als llocs de treball, la ICRP estableix que el nivell d'acció recomanat hauria d'estar entre 500 i 1500 Bq m⁻³ (ICRP, 1994a).

1.1.2. Estatus del radó a Espanya.

Actualment, Espanya disposa d'una normativa que regula totes les activitats relacionades amb l'energia nuclear i la protecció radiològica, i d'un organisme, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), que té la funció de controlar, supervisar i informar de tot el relacionat amb la seguretat nuclear i la protecció radiològica.

La primer vegada que es va incloure les fonts naturals de radiació a la legislació espanyola va ser l'any 2001 amb el Reglament sobre la protecció sanitària contra les radiacions ionitzants (Real Decreto 783/2001, 2001). Concretament, en els articles 62 i 63 (Títol VII), es fa referència a les exposicions degudes a la inhalació dels descendents del radó i del toró. En aquest reglament s'estableix la necessitat de dur a terme estudis en aquells llocs de treball on existeixin fonts naturals de radiació per tal de determinar si es produeix un increment significatiu de l'exposició dels treballadors o dels membres del públic.

Després de la publicació del nou reglament, el CSN va posar en marxa un pla d'actuacions que va permetre el finançament de projectes d'investigació, com el que emmarca aquest treball. Dins d'aquest pla d'actuacions també es va considerar el desenvolupament, juntament amb l'Institut Eduardo Torroja, d'una normativa específica per a la protecció contra l'exposició al radó a l'interior d'habitatges, amb l'objectiu d'incorporar-la al Codi Tècnic d'Edificació (CTE). Les idees principals d'aquesta normativa són les següents (Martín Matarranz, 2004):

- Com que a la legislació espanyola no existeix cap requeriment respecte a la protecció al radó en habitatges es proposa el valor recomanat per la CEC de 200 Bq m^{-3} .

- Tot el territori espanyol queda classificat en tres nivells, segons la potencialitat de l'exposició al radó a l'interior dels edificis. Aquesta classificació es fa a partir de les característiques geològiques, els nivells de radiació gamma obtinguts en el projecte MARNA (Suárez et al., 2000) i les dades disponibles de les concentracions de ^{226}Ra i ^{232}Th en sòls.

- Es fa una segona classificació només de les zones edificables, considerant fonamentalment dos factors: la concentració de radó existent en el sòl i la seva permeabilitat. Les mesures d'aquests dos paràmetres es realitzen seguint un protocol de mesura establert.

- La tècnica de mitigació escollida ve donada en funció de la categoria de la zona i pel tipus d'edificació. Algunes de les possibles solucions constructives són la incorporació de barreres contra el radó en els fonaments de l'edifici i la utilització de sistemes d'extracció actius o passius.

En el dia d'avui, però, aquesta normativa encara no ha estat inclosa al CTE.

1.1.3. Mesures del radó a Espanya i Catalunya.

Les primeres mesures de la concentració de radó en recintes tancats espanyols es va dur a terme a finals dels anys 80 per part de les Universitats de Cantàbria, València i Oviedo. L'any 1989 el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) va promoure l'inici de més campanyes de mesura, per part de diferents universitats i organismes nacionals, per determinar els nivells de radó a l'interior de recintes tancats del país. Entre els diferents grups que van participar en el Projecte Radón del CSN hi havia el Grup de Física de les Radiacions (GFR) de la Universitat Autònoma de Barcelona que, durant els darrers 16 anys, ha dut a terme diferents estudis relacionats amb el radó. L'Institut Nacional de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya també ha adquirit una àmplia experiència en l'estudi del radó i els seus descendents i en el seu Laboratori d'Estudis del Radó (LER) disposa, des de l'any 2002, d'una cambra de radó que compleix els requisits de calibratge de la normativa internacional. En aquesta cambra s'hi han dut a terme els primers calibratges i intercomparacions de sistemes de mesura de la concentració de radó en el país (Vargas et al., 2004).

A continuació es descriuen de forma general alguns dels resultats de les campanyes de mesura de radó en l'estat espanyol i concretament els relacionats amb les campanyes de mesura de la concentració de radó en el territori català o en zones volcàniques (Martín Matarranz, 2004).

A la primera campanya nacional es va mesurar un total de 1555 habitatges repartits per tot el territori amb l'objectiu de localitzar les zones de l'estat amb nivells de radó més elevats. Les mesures es van dur a terme durant l'hivern i de forma puntual, mitjançant un detector que agafava una mostra d'aire de l'interior d'una habitació que feia un mínim de 10 hores que estava tancada. Cal destacar que aquesta tècnica de mesura no va permetre obtenir els valors mitjos anuals de la concentració de radó i, per tant, la mitja nacional obtinguda va esdevenir un valor esbiaixat. La mitja geomètrica obtinguda fou de 41 Bq m^{-3} amb una desviació de 3 Bq m^{-3} i un rang de valors de 10 a 15400 Bq m^{-3} . A Catalunya es va dur a terme un total de 78 mesures i es va obtenir un nivell mig de la concentració de radó de 23 Bq m^{-3} amb un rang de valors de 10 a 1776 Bq m^{-3} (Quindós et al., 1991). A partir d'aquests primers resultats es va establir una relació entre els nivells de radó trobats i les característiques geològiques de cada zona. Això va permetre dividir el territori en tres grans zones. Es va observar que els valors mitjos de la concentració de radó obtinguts en els habitatges situats en roques paleozoiques amb formacions granítiques i pissarroses (Galícia, Serra de Guadarrama a Madrid i Extremadura), eren significativament superiors al valor mig nacional, mentre que els valors obtinguts en habitatges situats en formacions sedimentàries d'origen marí, principalment calcàries i marges, (València, La Rioja, Navarra, Catalunya, Balears i Múrcia) eren inferiors al valor mig nacional. Finalment els habitatges situats sobre formacions sedimentàries d'origen continental més modernes, amb argiles, sorres, gresos i roques calcàries, van donar valors propers a la mitja nacional.

Entre els anys 1990-1994, l'Estació Volcanològica de l'Institut de Recursos Naturals i Agrobiologia de Canàries del CSIC i la Universitat de la Laguna van dur a terme diferents campanyes de mesura de la concentració de radó en les Illes Canàries (Fernández-Aldecoa et al., 1992; Pinza Molina et al., 1995; 1996). Aquest arxipèlag representava una regió geològica addicional, degut al seu origen volcànic, presentant un gran nombre de formacions basàltiques, dipòsits piroclàstics i colades de lava. El nombre de recintes mesurats va superar els 300 habitatges i el rang de valors de la concentració de radó obtingut fou $[6 - 853] \text{ Bq m}^{-3}$, amb uns valors mitjos per les diferents illes entre 23 i 69 Bq m^{-3} (mitges geomètriques). De les set illes, quatre van donar valors superiors a la mitja nacional: Tenerife (69 Bq m^{-3}), Fuerteventura (59 Bq m^{-3}), Gran Canària (51 Bq m^{-3}) i Lanzarote (47 Bq m^{-3}).

A continuació s'esmenten les principals campanyes de mesura i els estudis relacionats amb el radó que ha realitzat el GFR en recintes tancats d'Espanya i Catalunya. El mètode de mesura més utilitzat per determinar la concentració de radó ha estat els detectors passius de traces nuclears, els quals permeten obtenir el valor mig anual amb major precisió.

Durant els anys 1990-1992 el GFR va dur a terme dues campanyes de mesura de la concentració de radó en habitatges de les ciutats de Madrid i Barcelona, en col·laboració amb el CIEMAT. L'objectiu era trobar el valor mig al qual estava sotmesa la població a les dues àrees més poblades d'Espanya. Es van obtenir uns valors mitjos anuals i uns rangs de valors de la concentració de radó de $45 [2-1670] \text{ Bq m}^{-3}$ i $28 [2-622] \text{ Bq m}^{-3}$, respectivament. Aquests resultats van posar de

manifest la influència dels tipus de sòls. A Madrid, els habitatges situats sobre sòls granítics van presentar nivells superiors als situats sobre sòls de tipus argilós, mentre que a Barcelona, amb un terreny sedimentari més homogeni, en general es van trobar valors més baixos (Baixeras et al., 1996a).

Entre els anys 1992-1993 es va dur a terme un estudi de les concentracions de radó a la població de Calaf, situada en una zona rica en urani. Es va distribuir un total de 78 dosímetres en dos períodes de mesura i en diferents tipus d'habitatges. El valor mig obtingut van ser de 89 Bq m^{-3} i el rang de valors $[15-500] \text{ Bq m}^{-3}$ (Baixeras et al., 1996b).

Durant els anys 1993-1995 es va dur a terme un estudi, en col·laboració amb l'INTE, de l'impacte radiològic ambiental produït pel gas radó a l'interior d'edificis. L'objectiu era caracteritzar els nivells de radó a Catalunya en funció dels diferents tipus d'habitatges i estudiar les variacions temporals de la concentració de radó utilitzant diferents tipus de detectors. Els valors mitjos obtinguts eren del mateix ordre que els que s'havien obtingut en campanyes anteriors, però s'observava que els valors més elevats es trobaven en cases rurals, més que no pas en cases unifamiliars o pisos (Baixeras et al., 1995a).

Entre els anys 1994-1995 es van realitzar mesures de la concentració de radó a la població de Teià, localitzada a una zona granítica a 20 km de Barcelona. Es va distribuir un total de 40 dosímetres entre 15 habitatges i l'escola del poble i el valor mig i el rang de valors de la concentració de radó van ser de 50 Bq m^{-3} i $[8 - 128] \text{ Bq m}^{-3}$, respectivament (Baixeras et al., 1996c).

En el marc d'un projecte de la Unió Europea es va dur a terme un estudi experimental en el qual es caracteritzava, per primera vegada a Espanya i des del punt de vista de la problemàtica del radó, una casa típica, real i habitada. Els nivells de la concentració de radó en el sòl i a l'interior de l'habitatge es va mesurar mitjançant detectors actius i passius. També es van mesurar els paràmetres meteorològics, les diferències de pressió entre l'aire del l'interior de la casa i la del sòl adjacent, així com la textura, la porositat i el contingut de radi en el sòl. Es va dissenyar, desenvolupar i posar a punt un model dinàmic i global de la generació, entrada i acumulació de radó en recintes tancats (RAGENA) que es va adaptar a una de les estances de l'habitatge estudiat, on s'havia mesurat la concentració de radó de forma continua, i es va comprovar que els resultats experimentals concordaven amb els predits pel model (Font, 1997).

Entre els anys 1996-1997, dins el marc d'un nou projecte europeu, anomenat KATRIN (1998), el GFR va dur a terme un estudi del sistema càrstic de Bastareny, del Parc Natural del Cadí-Moixeró, al sud dels Pirineus. En aquest estudi es van dur a terme diferents mesures de la concentració de radó en el terra i a l'aigua, utilitzant diferents tipus de detectors. Paral·lelament es va monitorar un conjunt dels paràmetres físics i meteorològics. Alguns dels resultats obtinguts es descriuen a l'apartat 1.4.5. on es parla de l'aplicació del radó per l'estudi de sistemes càrstics.

1.2. Característiques físiques i químiques del radó.

El gas radó, que inicialment tenia el símbol Em d'*emanació*, deu el seu nom actual al radi, del qual s'origina. És un gas noble i apareix a la taula periòdica com l'element de símbol químic Rn,

nombre atòmic 86 i pes atòmic 222. Té una densitat de 9.73 kg m^{-3} a la temperatura de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El seu punt de fusió es troba a una temperatura de $-72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i el d'ebullició a $-62 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A una temperatura ordinària es caracteritza per ser incolor, inodor i insípid però quan es solidifica presenta fosforescència brillant, que esdevé grogosa a baixes temperatures i vermell-taronjosa a la temperatura de l'aire líquid, $-140 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La seva concentració a l'aire atmosfèric és d'1 àtom per cada 10^{18} i té un coeficient de difusió en aquest medi de $0.1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. La seva solubilitat en aigua és gran i augmenta a mesura que disminueix la temperatura ($230 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i de $510 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

El gas radó es desintegra, com el seu pare el radi, emetent partícules α (nuclis d'heli constituïts per dos protons i dos neutrons) i donant lloc a altres elements. Es troba a les tres cadenes naturals de desintegració, la del Tori (^{232}Th), la de l'Urani (^{238}U) i la de l'Actini (^{235}U). La principal característica del radó, respecte dels altres elements de les cadenes naturals de desintegració, és el fet de ser un gas noble. Com que els àtoms de radó són químicament estables es poden moure lliurement sense reaccionar amb cap altre element. Aleshores, quan es formen en el sí d'un material se'n poden escapar amb molta facilitat i, desplaçant-se a través dels seus porus, arribar a l'aire exterior ràpidament.

1.2.1. Els isòtops del radó.

Es coneixen 17 isòtops del radó, però la majoria d'ells no es troben a la natura. Els tres isòtops naturals són el ^{219}Rn , el ^{220}Rn i el ^{222}Rn , anomenats respectivament actinó, toró i radó.

L'**actinó**, ^{219}Rn , és descendent directe del ^{223}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{235}U . La seva contribució a la radioactivitat natural és menyspreable degut a la petita raó isotòpica del ^{235}U respecte el ^{238}U ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.711 \%$) i al seu curt període de semidesintegració ($T_{1/2} = 4 \text{ s}$) responsable de que es desintegri dins els materials on es forma abans d'arribar a l'aire exterior. Per tant, des del punt de vista de la protecció radiològica, no té cap importància.

El **toró**, ^{220}Rn , és descendent directe del ^{224}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{232}Th . Dels tres isòtops del radó és el més abundant a la natura però, en general, el seu impacte radiològic és petit degut al seu curt període de semidesintegració ($T_{1/2} = 55 \text{ s}$).

El **radó**, ^{222}Rn , és descendent directe del ^{226}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{238}U . Dels tres isòtops és el que té el període de semidesintegració més llarg ($T_{1/2} = 3.824 \text{ dies}$) i, per tant, el que pot arribar a unes concentracions en aire més grans. Això fa que tingui més importància radiològica i també que el seu nom sigui el mateix que el del conjunt del gas, a diferència dels altres dos isòtops que tenen noms propis.

Si tinguéssim una mescla d'aquests tres isòtop en les mateixes proporcions, al cap de poc temps hauria evolucionat de tal forma que només trobaríem el radó, ja que amb menys d'un minut hauria desaparegut pràcticament tot l'actinó i en una hora el toró. Aquesta diferència en els períodes de semidesintegració també fa que la distància que pot viatjar l'actinó i el toró a través d'un medi abans de la seva desintegració sigui molt més curta que la del radó.

En els següents capítols d'aquest treball només es parla del radó, referint-se a l'isòtop ^{222}Rn , i de forma excepcional també s'anomena al toró. Quan un àtom de radó es desintegra, emetent una partícula α de 5.49 MeV d'energia, esdevé un nou element, el ^{218}Po , que també és radioactiu, amb un període de semidesintegració d'uns 3 min, però que ja no és un gas com el seu pare. A la **Figura 1.3** es mostra l'esquema de la cadena natural de desintegració del ^{238}U .

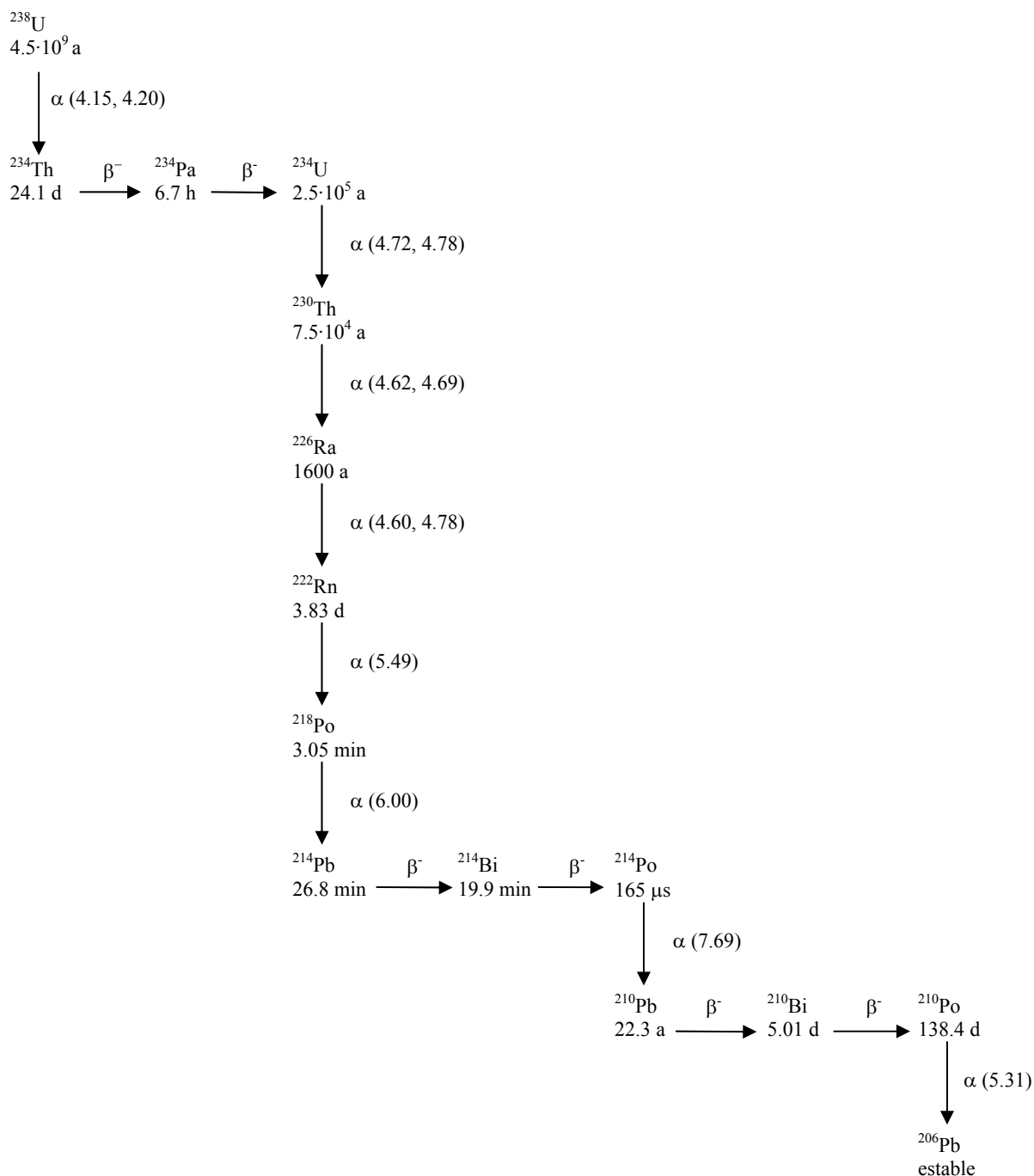


Figura 1.3. Cadena desintegració del ^{238}U amb els períodes de semidesintegració de cada radionúclid i les energies de les emissions α , expressades en MeV.

1.2.2. Els descendents del radó.

Els descendents del radó són metalls pesants, de càrrega positiva i químicament molt actius. Segons el seu període de semidesintegració es poden dividir en dos grups:

- Els de vida mitja curta, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po , amb uns períodes de semidesintegració inferior a 30 minuts, el què els atribueix una major influència en la contaminació interna.
- Els de vida mitja llarga, ^{210}Pb , ^{210}Bi i ^{210}Po , amb uns períodes de semidesintegració superiors a 5 dies. La cadena de desintegració finalitza amb el ^{206}Pb que és estable.

Com que el període de semidesintegració dels descendents de vida mitja del radó és molt més petit que el del propi radó, en unes condicions ideals en que inicialment no tinguem concentració d'aquests descendents, ràpidament (< 3.5 h) s'arriba a una situació d'equilibri radioactiu (secular), en el qual el ritme de desintegració dels fills que es van formant ve marcat per la pròpia desintegració del pare. En condicions reals, però, no tenim aquest equilibri degut al fet que els descendents, en ser metalls pesants, s'adhereixen en major o menor grau als aerosols presents a l'aire i es dipositen sobre superfícies, trencant l'equilibri radioactiu.

1.2.3. Quantitats i unitats especials.

La concentració d'activitat del radó, C_{Rn} , també anomenada directament concentració de radó, és el nombre de desintegracions produïdes per unitat de temps, A_{Rn} , i de volum d'aire, V .

$$C_{Rn} = \frac{A_{Rn}}{V} \quad (1.1)$$

Les seves unitats són el Becquerel per metre cúbic (Bq m^{-3}) o el picocuri per litre (pCi l^{-1}), que equival a 37 Bq m^{-3} .

Un dels paràmetres necessaris per determinar la dosi de radiació que rep la població és el factor d'equilibri del radó amb els seus descendents. Aquest factor es defineix com el quocient entre la concentració equivalent a l'equilibri i la real del radó i, per tant, caracteritza el desequilibri entre el conjunt de tots els descendents i el radó en termes d'energia potencial α . L'energia potencial α d'un àtom d'algun descendent del radó és la suma de les energies de les partícules emeses durant la seva desintegració fins arribar al ^{210}Pb i, per tant, és l'energia susceptible de ser transferida al teixit pulmonar.

Les expressions que permeten calcular totes aquestes magnituds, així com totes les seves definicions i unitats, es troben la ICRP 65 (1994a), veure l'Annex A: Quantitats i unitats especials.

1.3. Dinàmica del radó.

1.3.1. Generació i emanació del radó.

El radó es forma en desintegrar-se el radi ^{226}Ra que es troba present, en major o menor grau, a qualsevol material de l'escorça terrestre. La quantitat de radó produïda depèn del contingut de radi en els materials, el qual ve donat típicament com una activitat per unitat de massa seca (Bq kg^{-1}) i depèn del contingut de ^{238}U present en el material.

Tot material està format d'uns grans de mida variable i d'un espai porós, anomenat intersticial, que està ple d'alguns fluids, principalment aire i/o aigua. De tot el radó que es crea en els grans, una part pot passar a l'espai intersticial del material i després viatjar a través d'aquest fins arribar a l'aire exterior.

L'emanació del radó consisteix en l'alliberament dels àtoms de radó que han estat creats en els grans del material i que arriben a l'espai intersticial abans de desintegrar-se. Aquest fet es produeix, principalment, gràcies al retrocés que experimenta l'àtom de radó quan es desintegra el nucli de radi, degut a la conservació del moment lineal. A la fracció d'àtoms que surt dels grans del material respecte dels que es creen en el seu interior se l'anomena coeficient d'emanació (f).

1.3.2. Transport i exhalació del radó.

El transport del gas radó a través de l'espai intersticial del material es produeix mitjançant dos mecanismes:

Difusió: S'expressa mitjançant la llei de Fick, la qual diu que un fluid tendeix a moure's en la direcció oposada en què augmenta el seu gradient de concentració. Es defineix la densitat de flux d'activitat a través de l'àrea dels porus com:

$$\phi_d = -D_e \nabla C_{Rn} \quad (1.2)$$

on D_e és el coeficient efectiu de difusió ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) i C_{Rn} és la concentració d'activitat de gas radó en l'espai intersticial (Bq m^{-3}) (Nazaroff i Nero, 1988).

Un paràmetre equivalent al coeficient efectiu de difusió és la longitud de difusió l_d (m) que s'obté a partir de l'expressió:

$$l_d = \sqrt{D_e \lambda_{Rn}^{-1}} \quad (1.3)$$

on λ_{Rn} és la constant de desintegració del radó ($2.1 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$).

Advecció: La llei de Darcy relaciona la velocitat del fluid v que travessa una determinada àrea

perpendicular al flux amb el gradient de pressió segons l'expressió:

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (1.4)$$

on k és la permeabilitat del medi (m^2) i indica la facilitat amb la que el fluid l'atravessa, P és la pressió (Pa) i μ és la viscositat dinàmica de l'aire en els porus del medi (Pa·s). Aleshores, la densitat de flux d'activitat deguda a l'advecció s'obté de l'expressió:

$$\phi_a = \frac{C_{Rn}}{\varepsilon} v \quad (1.5)$$

on ε és la porositat del medi.

La densitat de flux total del radó és una combinació dels fluxos de difusió i advecció:

$$\phi = \phi_d + \phi_a \quad (1.6)$$

Al procés de sortida del radó des dels porus del material on s'ha creat cap a l'aire exterior se l'anomena exhalació i la velocitat en que això es produeix és el ritme d'exhalació, expressat en unitats de $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$. Aquesta magnitud experimenta variacions importants ja que depèn dels gradients de pressió, de concentració de radó i d'altres característiques físiques del medi que també poden canviar.

El coeficient efectiu de difusió depèn de la porositat i del contingut d'aigua, el qual depèn de les precipitacions i del regatge de cada zona concreta. El coeficient de difusió pel radó en materials secs és molt més gran que el de materials saturats, la qual cosa indica que el contingut d'aigua en els porus del medi és el paràmetre que influeix més en el coeficient de difusió.

La permeabilitat del medi és un paràmetre molt important en l'exhalació del radó, ja que ens diu amb quina facilitat el fluid pot travessar el material. A part de dependre de la porositat i del contingut d'aigua del medi, també depèn de la mida i forma dels seus porus, que poden canviar per l'acció de processos dinàmics com el desenvolupament de fractures, la formació de canals per les arrels de les plantes, etc. Pot prendre un espectre molt ampli de valors; des de $10^{-7}\ m^2$ en grases fins a $10^{-16}\ m^2$ en argiles. Per als valors baixos, domina el transport per difusió, mentre que per als alts ho fa el transport per advecció. Els valors mitjos de l'exhalació en sòls i materials de construcció són $0.02\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ i $5 \cdot 10^{-4}\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$, respectivament (Porstendörfer 1994).

1.3.3. El radó en l'aire atmosfèric.

En general, quan el radó arriba a l'aire atmosfèric es difon ràpidament. La concentració mitja de radó a l'atmosfera té un valor situat entre 3 i $7\ Bq\ m^{-3}$. En canvi, dins un recinte tancat el radó pot quedar confinat i la seva concentració pot arribar a assolir valors molt elevats.

El principal mecanisme d'exhalació del radó a l'atmosfera és la difusió molecular. Una expressió que permet estimar el ritme d'entrada per difusió del radó a l'atmosfera procedent d'un material porós i homogeni és la següent (UNSCEAR, 2000):

$$J_D = C_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho_s (1 - \varepsilon) L \quad (1.7)$$

on C_{Ra} és la concentració d'activitat del ^{226}Ra en el material, λ_{Rn} és la constant de desintegració del ^{222}Rn ($2.1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), f és el coeficient d'emanació del material, ρ_s és la densitat dels grans, ε és la porositat del material sec i L és la longitud de difusió, que s'obté de l'expressió (1.3).

A part del ritme d'exhalació, existeixen altres factors que condicionen les concentracions de radó en l'aire exterior. Aquests són les condicions meteorològiques, tal com la temperatura del sòl i de l'aire exterior, la pressió atmosfèrica, la humitat i la velocitat del vent, i l'alçada respecte el sòl, ja que la concentració de radó disminueix al augmentar l'alçada. Un factor que influeix molt són les variacions de la pressió atmosfèrica. Quan la pressió disminueix, l'exhalació del radó augmenta degut al fenomen de bombeig d'aire i, en canvi, quan la pressió augmenta l'aire atmosfèric tendeix a penetrar en el sòl, la qual cosa frena la sortida del radó.

En zones continentals localitzades on hi ha fonts de radó importants o en el cas de condicions meteorològiques determinades, com la inversió tèrmica o èpoques de poca precipitació, la concentració de radó en l'atmosfera pot arribar a tenir valors elevats. En canvi, en zones oceàniques, aquesta concentració presenta uns valors molt baixos degut bàsicament a la poca presència de radi a l'aigua dels oceans i l'alta solubilitat de radó en l'aigua a baixes temperatures. D'aquesta forma, la concentració de radó en zones costeres és, en general, menor que en zones continentals.

1.3.4. El radó en recintes tancats.

La concentració de radó en interiors depèn de la facilitat amb que aquest pugui penetrar a l'interior dels recintes. Bàsicament ho pot fer directament a través del sòl i els materials de construcció on s'ha format o mitjançant algun medi que el transporti, com per exemple, corrents d'aire, l'aigua o el gas natural. Aquests modes d'entrada constitueixen les fonts de radó.

Per estimar el ritme d'exhalació del radó per difusió molecular des dels materials de construcció cap a l'aire interior d'un recinte és pot utilitzar l'expressió:

$$J_D = C_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho_s L \tanh(d/L) \quad (1.8)$$

on d és el gruix mig del bloc de material (UNSCEAR, 2000).

En el cas dels recintes tancats existeixen alguns processos que generen diferències de pressió, com les diferències de temperatura entre l'interior i l'exterior, la velocitat del vent, etc., que fan que l'advecció també jugui un paper important en el procés d'exhalació del radó cap a l'interior dels recintes, a part de la difusió molecular.

És un fet molt constatat que en els casos on la concentració de radó és molt elevada la principal font de radó és el sòl, on es troben concentracions de radó de l'ordre dels kBq m^{-3} . Les altres possibles fonts que acostumen a seguir en importància són els materials de construcció i els corrents d'aire. La contribució de l'aigua i el gas natural com a fonts de radó en general és molt petita i només és considerable en el cas de que el seu contingut en radó sigui excepcionalment elevat. En el cas de l'aigua, per exemple, només es troben concentracions altes en aigües subterrànies.

Per tal de caracteritzar l'entrada de radó a l'interior d'un recinte es defineix el ritme específic d'entrada deguda a una font com l'activitat de radó per unitat de temps i de volum d'aire interior. Aquesta magnitud té unitats de $\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. A la **Taula 1.3** es donen els valors mitjos dels ritmes específics d'entrada i de la concentració de radó per diferents fonts, així com el seu rang de variació (ICRP, 1987).

Taula 1.3. Valors mitjos i rang de variació dels ritmes específics d'entrada i concentracions de ^{222}Rn degudes a diferents fonts.

Font	Ritme específic d'entrada ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)		Concentració de radó a l'interior* (Bq m^{-3})	
	Valor mig	Rang	Valor mig	Rang
Ciment o totxo	2-20	1-50	3-30	0.7-100
Fusta	<1	0.05-1	<1	0.03-2
Sòl	1-40	0.5-200	2-60	0.5-500
Aire exterior	2-5	0.3-15	3-7	1-10
Aigua o gas natural	<0.1	0.01-10	<0.1	0.01-10
Totes les fonts	6-60	2-200	10-1000	2-500

* referida a una taxa mitja de ventilació de 0.7 h^{-1} .

Normalment s'utilitza l'aire atmosfèric com element de dilució del radó en un recinte tancat. Mitjançant la ventilació del recinte es poden disminuir les altes concentracions de radó. Es defineix la cadència de ventilació, λ_v , amb unitats de h^{-1} , com el ritme d'intercanvi entre l'aire interior i l'aire exterior en un recinte tancat. Si el volum d'aire interior d'un recinte tancat és V_{in} , aleshores $V_{in}\lambda_v$ és el volum d'aire que s'intercanvia amb l'exterior cada hora.

Per assolir un nivell més alt de comprensió dels processos d'entrada i eliminació del radó a l'interior de recintes tancats s'han establert diferents tipus de models, com el RAGENA (Font, 1997) o el TRANSRAD (Albarracín, 1999), que intenten resoldre les equacions del procés de transport sota algunes aproximacions sobre l'estructura del sòl, dels materials de construcció, dels camins d'entrada i de les condicions de control. Una revisió dels diferents models d'entrada es dona a Andersen (2003). Això permet, entre altres coses, estimar l'efecte que tindrà sobre la concentració de radó el fet d'utilitzar diferents tècniques de construcció, trobar els factors que afavoreixen la disminució del nivell del radó, com la ventilació subterrània, predir les concentracions de radó a llarg termini a partir de mesures ràpides i estudiar l'impacte dels canvis de les característiques dels recintes sobre l'exposició al radó per part del públic en general.

1.4. Aplicacions del radó en les Ciències de la Terra i el Medi Ambient.

Una part molt important de la recerca relacionada amb el gas radó està dedicada a la radioprotecció, però el fet de poder mesurar variacions significatives de la concentració de radó en aire, sòl i aigua converteix aquest gas en una bona eina de treball per algunes camps de les Ciències de la Terra. Els camps on el seu estudi s'ha desenvolupat especialment són en el de la Geofísica i en el de la Hidrogeologia. A continuació es descriuen de forma general algunes de les aplicacions del gas radó en aquests camps (Font 2002).

1.4.1. Predicció de terratrèmols i vigilància volcànica.

Aquesta línia d'investigació del radó, amb més de dues dècades de vida, està íntimament lligada amb la geodinàmica interna de la Terra (Monnin i Seidel, 1992). Els canvis de pressió en les roques, l'augment o el segellament de fissures de l'escorça terrestre, etc. són fenòmens geològics que poden afectar els mecanismes d'emanació i transport del radó en el subsòl. Per tant, mesurar unes variacions importants dels nivells de radó en el terra o les aigües pot servir per localitzar falles actives, per preveure futurs terratrèmols i per investigar l'estructura, el comportament i la dinàmica dels volcans, per tal de predir-ne futures erupcions. Recentment s'han realitzat moltes mesures de nivells de radó en aire, terra i aigües subterrànies de forma continua en aquest sentit (Ioannides et al., 2003; Segovia et al., 2003; Immè et al., 2006).

Un cas en el que es poden detectar variacions importants de la concentració de radó és quan hi ha aquífers amb aigües riques en radó pròximes a un sistema volcànic. Si en algun moment té lloc el pas de gasos com CO₂, H₂S, CH₄, aire, etc., procedents de l'interior de la Terra, a través d'aquestes aigües subterrànies, es produeix una desgasificació del radó que hi havia dissolt. Aquest procés, que esdevé més important com més dura el pas d'aquests gasos, provoca un augment important de la concentració de radó en els nivells superiors del terra o a les aigües més superficials i la seva detecció pot servir d'indicador de l'activitat volcànica (Garcia-Vindas et al, 2005). Un exemple molt clar d'aquest fet es va poder observar amb les mesures de radó realitzades durant l'any 1995 al Japó, les quals indicaven un increment significatiu de la concentració de radó en l'aire exterior i en l'aigua subterrània just abans d'un gran terratrèmol (Igarashi et al., 1995).

1.4.2. Prospecció d'urani i heli.

El gas radó també s'ha utilitzat com a eina en la prospecció geoquímica d'urani (Singh et al., 1986). La mesura de la concentració de radó acostuma a fer-se directament en el sòl. Quan les mesures de l'exhalació del radó donen valors superiors a dos o tres vegades el valor mig del fons, es consideren indicadores de la presència de jaciments d'urani (Khan, 1991).

També es realitzen mesures de radó en aigües subterrànies amb aquest objectiu però la tècnica presenta alguns inconvenients, ja que el tipus de roca i la naturalesa de l'aquífer determinen més el

contingut de radó de les aigües que no pas el contingut d'urani d'aquestes formacions. Quan l'aigua passa per una veta rica en urani, el seu contingut de radó es veu incrementat significativament pel procés de difusió, però aquest increment de radó es va atenuant amb la distància degut a la dissolució i la desintegració. La distància al llarg de la qual una anomalia d'aquestes persisteix i pot ser detectada depèn del moviment de l'aigua i de si el nivell inicial de radó era suficientment baix. Per tant, aquesta tècnica només es pot utilitzar quan inicialment les aigües analitzades tenen un fons de radó baix i no són molt turbulentes al llarg dels aquífers.

Constantment estan sorgint noves aplicacions del radó, com per exemple per localitzar fonts d'heli en zones geotermals (Ghose et al., 2003).

1.4.3. Explotació d'energia geotèrmica.

La contribució del radó a l'explotació de l'energia geotèrmica es produeix a dos nivells. Per un costat, la mesura dels nivells de radó anòmals en el sòl d'una zona geotèrmica permet la identificació de falles geològiques actives el què, juntament amb les mesures de la resistivitat elèctrica, la gravetat, etc., permet optimitzar l'eficiència de la prospecció, reduint el nombre de perforacions. Per l'altre costat, la mesura dels isòtops del radó, junt amb la dels seus predecessors (isòtops de radi) permet l'estudi de l'evolució termodinàmica de la reserva geotèrmica i de les seves característiques, tals com l'entropia, el procés de recàrrega, el potencial de la reserva per incrementar la producció, etc. (Balcázar et al., 1993).

1.4.4. Traçador de processos ambientals.

Són varis els radionúclids que s'utilitzen com a traçadors de processos mediambientals (^3H , ^{137}Cs , ^{14}C , etc) i el radó també es pot utilitzar en alguns casos. Degut al seu període de semidesintegració de 3.8 dies es pot fer servir per estudiar processos que no tenen durades gaire llargues, per exemple, com a traçador de moviment de masses d'aire. En el cas de l'aire permet estudiar l'intercanvi de masses d'aire entre l'oceà i el continent. També s'utilitza per la mesura de l'alçada de la capa de mescla atmosfèrica (h) com alternativa als mètodes convencionals, tals com les torres meteorològiques i els globus sonda. La mesura de la variació de la concentració de radó a l'aire permet el càlcul de la variació d'aquesta alçada h en funció del temps, coneguda l'exhalació continental de radó i la velocitat mitja del vent. Un cop caracteritzada h i mesurada la variació temporal d'un contaminant abocat a l'atmosfera, és possible determinar la intensitat de la font del contaminant. Aquesta metodologia ha estat usada, per exemple, per avaluar la intensitat de dos contaminants urbans, els ions grans positius i el plom, ambdós procedents dels automòbils (Garzón et al., 1986; González i Garzón, 1978). Anàlogament aquestes aplicacions es poden transportar en els medis aquosos. La concentració de radó en els rius, llacs, etc. normalment és baixa, excepte en aquelles àrees on s'incorporen grans masses d'aigua subterrània amb continguts elevats de radó (Mulligan et al., 2006).

1.4.5. Estudi de sistemes càrstics.

Com que les formacions càrstiques no són riques en radi, el radó present a l'interior de les galeries o dissolt a les aigües subterrànies no es genera en les roques més pròximes sinó que prové d'altres regions i viatja a través de les esquerdes. Alguns estudis duts a terme en afloraments d'aigües subterrànies han permès correlacionar el radó amb paràmetres físics com el flux d'aigua, la temperatura o la conductivitat. El GFR, en el marc del projecte europeu KATRIN (1998), va realitzar un estudi dels corrents d'aigües subterrànies a la zona càrstica de Bastareny, situada al Parc Natural del Cadí-Moixeró, al sud dels Pirineus. En aquest estudi es van dur a terme mesures de la concentració de radó en el terra i a l'aigua, mitjançant diferents tipus de detectors, de forma continua i també realitzant mesures puntuals (Morin et al., 1999). Paral·lelament es va monitorar de forma continua alguns paràmetres físics i meteorològics, com la temperatura, la precipitació, la conductivitat de l'aigua, etc. Un dels resultats més importants de l'estudi és el fenomen que apareix a la **Figura 1.4**, on s'observa un augment de la concentració de radó un factor 3 en el moment que es produeix un augment en el ritme de corrent d'aigua, Q , en una de les fonts del sistema càrstic. Això és degut a la ràpida desgasificació del radó que hi havia dissolt a l'aigua. A continuació la concentració de radó experimenta una disminució més ràpida que la del flux fins arribar al nivell inicial després de 2 dies.

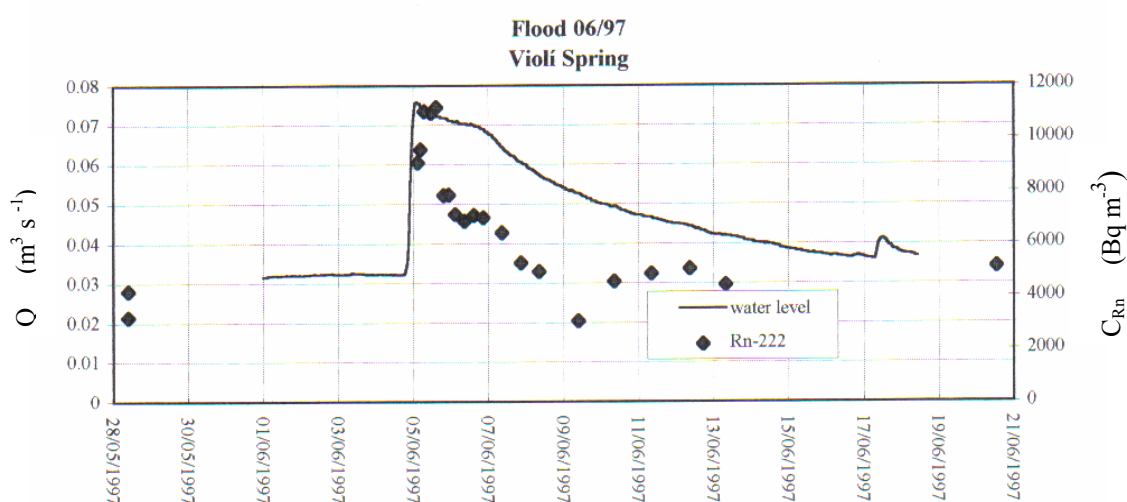


Figura 1.4. Comparació entre la concentració de radó i el ritme de corrent d'aigua d'una font de la zona càrstica de Bastareny durant el juny de 1997.

Aquest resultat indicava que la concentració de radó en l'aigua estava relacionada amb el ritme del corrent i, per tant, el radó era un bon indicador de les fases de càrrega i descàrrega dels aquífers càrstics. De la mateixa forma, també es va comprovar que les diferències de concentració de radó en l'aigua, provocades per la desgasificació quan aquesta es trobava en moviment turbulent, permetien localitzar fonts d'aigües subterrànies a l'interior dels aquífers càrstics. Anàlogament, es justificava la utilitat d'aquestes diferències de concentració per la determinació dels temps de residència de l'aigua en el subsòl.

2. La detecció del radó.

La mesura del radó i els seus descendents es basa en la detecció de les partícules α , β , i γ emeses durant les seves desintegracions radioactives i es pot dur a terme mitjançant diferents mètodes de mesura. En funció de quins són els objectius de l'estudi que es vol realitzar cal escollir, entre les diferents possibilitats, aquella que combini un detector adequat a l'estudi amb una bona tècnica de mostreig. A continuació es descriuen de forma general els diferents tipus de mesura i els diferents tipus de detectors.

2.1. Tipus de mesures.

En funció de la durada del mostreig, les mesures es poden classificar en tres tipus diferents:

Mesura puntual o instantània: El mostreig es realitza durant un període de temps molt curt, inferior a 2 hores. El resultat del recompte representa el valor de la concentració de la variable buscada en un instant concret. Aquest tipus de mesura només permet fer una estimació ràpida de la concentració de radó i, per tant, no és adequat per obtenir els valors mitjos anuals.

Mesura en continu: El mostreig es realitza de forma continua durant un cert període de temps, que va des d'algunes hores fins a varis dies o, fins i tot, mesos. Generalment, es registra durant tot el procés que dura la mesura i els resultats del recomptes s'obtenen en uns intervals de temps, anomenats temps d'integració, que acostumen a ser curts, des d'alguns minuts fins a varies hores. Aquest tipus de mesura es realitza per estudiar l'evolució temporal del nivell de radó o dels seus descendents i les seves correlacions amb paràmetres mediambientals. També s'utilitza en la localització de fonts de radó amb l'objectiu de dur a terme accions de mitigació.

Mesura integrada: En aquest cas, el mostreig es realitza en períodes relativament llargs que poden variar des d'alguns dies fins a varis mesos, depenent del nivell de radó mesurat. Aquest tipus de mesura permet determinar la concentració mitja anual de radó en habitatges i llocs de treball. Com que la concentració de radó pot experimentar variacions temporals importants, s'acostuma a mesurar en diferents períodes d'exposició fins a completar un any i després es calcula el valor mig dels resultats obtinguts.

2.2. Tipus de detectors.

Els diferents tipus de detectors utilitzats per mesurar la concentració de radó i/o els seus descendents es poden classificar en dos grans grups:

Detectors actius: Sistemes que necessiten algun tipus de subministrament d'energia elèctrica mentre dura la mesura. Aquesta definició inclou tots els sistemes que tenen una alimentació amb bateries o connexió a la xarxa elèctrica i que consten de bombes d'aire i/o electrònica associada.

Detectors passius: Sistemes que no necessiten cap aportació d'energia elèctrica al llarg de la mesura.

També es diferencia entre detectors actius i passius, considerant actius aquells que generen un senyal enregistrable en el mateix moment en que la radiació travessa el material del detector, i els passius són els que registren el pas de la radiació de forma permanent, almenys durant tota l'exposició. Amb els detectors actius s'acostuma a fer una mesura instantània o en continu de la concentració de radó mentre que amb els detectors passius es realitzen mesures integrades de la concentració de radó.

Existeixen altres criteris per classificar els diferents sistemes de mesura, com per exemple, segons el tipus de radiació que detecten o segons el fet de si detecten només el radó, només els descendents, tot conjuntament, o si poden discriminar entre radó i toró, etc.

A continuació es descriuen, per cadascun d'aquests dos grups generals, els tipus de detectors més importants i més utilitzats per la mesura del radó i els seus descendents.

2.2.1. Tipus de detectors actius.

En aquests sistemes de mesura, en general, l'entrada d'aire es realitza a través d'un filtre que permet l'entrada del gas radó en el volum de detecció però que reté els seus descendents i altres partícules en suspensió. Aquesta entrada d'aire pot ser per difusió o forçada, mitjançant l'ús d'una petita bomba d'aire. En els equips que tenen l'entrada per difusió, una part important del toró es desintegra en el filtre, degut al seu curt període de semidesintegració de 55 s. En canvi, en els equips amb entrada forçada d'aire, normalment el toró és capaç d'entrar a l'interior del volum de detecció i, per tant, també es mesura.

Existeixen bàsicament tres tipus diferents de detectors actius:

Cambres de ionització: Aquests detectors estan formats per una cambra, normalment cilíndrica, a dins de la qual hi ha aire o un altre gas que s'ionitza com a conseqüència de les desintegracions del radó que penetra en el seu interior. Aquesta ionització produeix càrregues elèctriques que són recollides en uns elèctrodes per l'acció d'un camp elèctric. Els polsos elèctrics produïts són amplificats i analitzats mitjançant un microprocessador. Aquest sistema de mesura permet fer espectrometria, diferenciant les energies de les partícules alfa procedents de la desintegració del radó, del ^{218}Po i del ^{214}Po . Els espectres α obtinguts amb aquests detectors no tenen prou resolució en energia com per diferenciar els pics procedents del toró i els seus descendents dels del radó i, per tant, no es pot fer una distinció entre aquests dos gasos. Un exemple d'aquest tipus de detector és l'Alphaguard¹.

Cambres amb detectors de semiconductor: Normalment, l'aire es difon cap a l'interior de la cambra a través d'un filtre. La cambra consisteix en una esfera o cilindre amb un detector de tipus

¹ Fabricat per Genitron Instruments GmbH, Heerstrasse 149, D-60488 Frankfurt a.M., Alemanya.

semiconductor dissenyat per la detecció de partícules alfa. Hi ha detectors que són més simples que altres. La sonda Clipperton (Monnin et al. 1998), per exemple, només fa un recompte de les desintegracions del radó i, en canvi, el RAD 7² permet fer espectrometria alfa. En aquests sistemes més complets la deposició electrostàtica de ions a la superfície del detector dona lloc a un senyal en el corresponent canal d'energia. Gràcies a la gran resolució de l'espectre alfa obtingut amb aquests equips es poden distingir fàcilment els pics dels descendents del radó i el toró, per tant, es poden determinar les concentracions d'aquests dos gasos.

Cambres de centelleig (Cel·les de Lucas): L'aire és bombejat cap a l'interior de la cel·la passant a través d'un filtre. Quan les partícules alfa que es formen a la desintegració del radó arriben a les parets de la cel·la, recobertes per una capa de sulfur de zinc (SZn), produeixen centelleigs de llum. La cambra està connectada amb un tub fotomultiplicador que converteix aquests centelleigs en polsos elèctrics que es poden registrar amb un comptador. Aquest sistema de mesura no realitza espectrometria de les partícules alfa, i com a conseqüència, no és capaç de discriminar entre el gas radó i el gas toró. Un exemple d'aquest tipus de detector és el PRASSI³.

2.2.2. Tipus de detectors passius.

Els principals detectors passius són:

Detectors sòlids de traces nuclears (DSTN): Les partícules α procedents del radó i els seus descendents arriben a la superfície sensible del detector i produeixen la ruptura de les macromolècules del material plàstic, produint el que es coneix com una traça. Aquestes traces esdevenen visibles després de sotmetre el detector a un revelatge químic o electroquímic. El seu recompte es pot realitzar mitjançant un sistema de lectura i anàlisi d'imatges. El nombre de traces per unitat d'àrea que apareixen a la superfície del detector és proporcional al contingut d'isòtops emissors alfa en el volum d'aire mesurat. Aquest tipus de detector àmpliament utilitzat es pot trobar exposat directament a l'aire lliure o muntat dins un recipient amb un filtre. Alguns exemples de detectors de traces de partícules α en plàstics són el LR-115⁴ (nitrat de cel·lulosa), el CR-39⁵ i el Makrofol⁶ (policarbonats).

Detectors de carbó activat (canister): Aquest sistema de detecció utilitza la propietat que té el carbó per absorbir gasos, com el radó. El carbó activat va col·locat dins un recipient i, quan aquest s'obre, absorbeix el radó que es difon en el seu interior. L'exposició finalitza quan es torna a tancar el recipient. La quantitat absorbida és proporcional al contingut de radó en l'aire del recinte. Aquest contingut de radó es determina posteriorment, mitjançant un detector de centelleig de NaI (TI), mesurant la radiació γ emesa pels descendents de vida mitja curta, com el ²¹⁴Bi, que es formen amb la desintegració del radó absorbit pel carbó. Degut al període de semidesintegració del radó (3.82 dies) aquesta mesura s'ha de fer com a molt 1 o 2 dies després d'haver tancat el recipient. La capacitat d'absorció també depèn molt de la humitat, per això s'acostuma a introduir un material dessecant junt

² Fabricat per DurrIDGE Company, 7 Railroad Ave., Suite D, Bedford, MA 01730, EEUU.

³ Fabricat per Silena S.p.A, Via Firenze, 3. 20063 Cernusco s/n, Milano, Italia.

⁴ Fabricat per Dosirad Campany, rue Lech Valesa, F-77185 Lognes, França.

⁵ Fabricat per Pershore Mouldings Ltd., Unit 5B, Trading Est, WR10 2DH Pershore, Regne Unit.

⁶ Fabricat per Bayer MaterialScience AG, Bayerwerk, 51368 Leverkusen, Alemanya.

amb el carbó. Això fa que el temps que dura l'exposició normalment sigui de pocs dies i, per tant, si es vol determinar el valor mig anual de la concentració de radó s'han de fer moltes mesures. Tot això complica la logística en una campanya a gran escala i per això només s'utilitzen per fer estimacions ràpides de la concentració de radó. Alguns d'aquests detectors porten incorporat un detector de termoluminescència que absorbeix l'energia de la radiació emesa pels descendents del radó formats dins el recipient. Aleshores aquests detectors es poden utilitzar per períodes de mesura entre una setmana i un mes.

Detectors de termoluminescència (TLD): Aquests detectors van col·locats dins unes cambres amb filtre, a l'interior de les quals es desintegra el radó. Els descendents que es formen són conduïts mitjançant un camp elèctric cap al material termoluminescent. El fenomen de la termoluminescència consisteix bàsicament en la capacitat que tenen alguns materials d'emmagatzemar la informació de l'energia dipositada per la radiació incident durant un cert període de temps. Aquesta energia és absorbida per l'estructura electrònica del material i posteriorment és emesa quan els electrons tornen al seu estat fonamental. És a dir, degut a la interacció amb la radiació incident, els electrons de la banda de valència passen a la banda de conducció, on poden circular i des d'on poden retornar a la banda de valència o caure a una trampa d'electrons estable. Un cop finalitzada la mesura, es procedeix a la lectura automàtica dels detectors mitjançant un instrument que escalfa els TLD. En escalfar-los, s'aporta l'energia tèrmica suficient perquè els electrons atrapats a les trampes pugin arribar a la banda de conducció, des d'on finalment retornen a la banda de valència. L'energia perduda pels electrons s'emet en forma de fotons visibles que són comptats automàticament pel sistema de lectura i proporcionen informació de l'energia de la radiació incident.

Electrets: Aquest detector consisteix en una cambra de plàstic conductor amb un aïllant elèctric d'alta estabilitat (electret) situat a la part inferior i que ha estat carregat a un cert potencial. La mesura comença quan s'obre la cambra i l'aire es difon en el seu interior a través d'un filtre per eliminar els descendents. Quan el radó es desintegra, l'aire de la cambra s'ionitza i els ions negatius que es formen són atrets cap a l'electret. Cada electró produeix una lleugera disminució del voltatge de l'electret. La mesura finalitza quan es tanca la cambra. Utilitzant un voltímetre especial, es mesura la càrrega de l'electret al principi i al final del període de mesura i la diferència de voltatge és proporcional a la concentració de radó en el recinte.

2.3. Els detectors utilitzats.

Per dur a terme les mesures de la concentració de radó en tots els recintes estudiats en el projecte que emmarca aquest treball s'han utilitzat dos tipus de detectors, un actiu i un passiu. A continuació es fa una descripció detallada d'aquests dos tipus de detectors i de les metodologies per la seva utilització.

2.3.1. Detector actiu: El monitor de radó PRASSI.

El monitor de radó PRASSI 5S és un monitor portàtil, comercialitzat per la marca italiana SILENA, que va adquirir el GFR l'any 1992 (veure la **Figura 2.1**). Aquest monitor permet fer

mesures puntuals i en continu del gas radó amb la tècnica del mesura de les cambres de centelleig sòlid (Cel·la de Lucas). Consisteix bàsicament en una cel·la d'1.83 litres de forma cilíndrica, recoberta per la part interior d'una capa de sulfur de zinc activat amb plata [ZnS(Ag)] i acoblada a un tub fotomultiplicador. En el punt d'entrada de l'aire exterior es col·loca un filtre de fibra de vidre que reté, entre altres partícules, els descendents del radó. El flux d'aire que entra a la cel·la, de 3 Lpm, està regulat electrònicament per compensar el fet que el filtre es pugui anar tapant al llarg de la mesura. Aquest detector també mesura les desintegracions del gas toró que aconsegueix arribar al volum sensible i no és capaç de distingir-les de les del radó. Un algoritme informàtic permet compensar els comptes procedents dels descendents dipositats a les superfícies interiors de la cel·la. Quan s'utilitza per fer mesures durant períodes de temps llargs el monitor ha d'estar endollat a la xarxa elèctrica. També disposa d'unes bateries que li proporcionen una autonomia de 8 hores en el cas que es faci servir en el camp. Mitjançant un display es poden visualitzar els resultats en el mateix moment de la mesura i observar l'evolució temporal. Es pot programar el temps d'integració de la mesura en un rang des de 15 minuts fins a 24 hores, amb intervals de 5 minuts. La memòria interna permet emmagatzemar fins a 6500 mesures. A través d'un port sèrie RS232 i mitjançant un ordinador també es pot controlar el seu funcionament, a més de permetre descarregar les dades obtingudes un cop finalitzada la mesura.



Figura 2.1. El monitor de radó PRASSI.

Aquest detector permet realitzar mesures molt acurades de la concentració de radó degut al seu baix fons. A l'hora de mesurar concentracions molt elevades s'ha d'anar en compte ja que els descendents sòlids que es formen a l'interior de la cel·la i que es dipositen a les seves parets, a la llarga, poden donar lloc a una certa contaminació i posteriors resultats erronis. En aquests casos, després de la mesura s'ha de procedir a fer un Flashing, que consisteix en fer passar nitrogen pur durant 15 minuts per l'interior de la cambra de mesura. Aquest monitor també ofereix la possibilitat de realitzar mesures de la concentració de radó en mostres de sòl i aigua utilitzant un sèrie d'accessoris i muntant un circuit d'aire tancat (Soavi, 1994).

2.3.2. Detectors passius: Els detectors de Makrofol.

Durant els últims 25 anys el GFR de la UAB ha treballat en l'aplicació dels Detectors Sòlids de Traces Nuclears (DSTN) en diferents camps d'investigació com els Raigs Còsmics (Casas et al., 1983; Domingo et al., 1996), Interacció de ions pesants amb la matèria (Domingo et al., 1998; Domingo et al., 2003), Dosimetria de Neutrons (Bouassoule et al., 1999; García, et al., 2005) i Dosimetria de Radó (Fernández et al., 1986; Baixeras et al., 1991; Font, 1993; Amgarou, K., 2002).

Quan es va decidir utilitzar aquest tipus de detector passiu per mesurar la concentració de radó a l'interior de recintes tancats es va haver de posar a punt tot un sistema de revelat, lectura i anàlisi que permetés extreure la informació registrada (Baixeras et al., 1989; García, 1990). Al llarg dels anys s'han anat introduint algunes modificacions que han permès optimitzar i semi-automatitzar tot el sistema de mesura (Amgarou, 2002). Com que la majoria dels aspectes que es van tenir en compte en el moment de l'elecció d'aquest tipus de detectors segueixen vigents a l'actualitat, s'ha considerat que aquest mètode de mesura era el més adequat per dur a terme els objectius del present estudi.

El detector de traces nuclears utilitzat és un tipus de policarbonat anomenat Makrofol-DE. Aquest detector és capaç de registrar les partícules α procedents de les desintegracions dels àtoms de radó, toró i dels seus descendents emissors α : ^{218}Po , ^{214}Po , ^{216}Po , ^{212}Bi , respectivament. En canvi, no registra les partícules més lleugeres que les α ni la radiació electromagnètica i, per tant, els descendents que són emissors β i/o γ no hi deixen cap senyal.

Aquest detector de Makrofol es col·loca a l'interior d'una petita cambra de difusió per constituir el conjunt anomenat dosímetre. Aquest dosímetre pot mesurar, en un temps d'exposició de tres mesos, una concentració de radó de 55 Bq m^{-3} amb una incertesa relativa del 10 %. Tots les cambres de difusió utilitzades en aquesta campanya procedeixen del centre de recerca Forschungszentrum Karlsruhe⁷ (FzK) d'Alemanya, centre amb una àmplia experiència en Dosimetria Radó (Urban, 1986), i del qual el Grup de Física de Radiacions de la UAB en va adquirir de l'orde de 1000 unitats a principis de la dècada dels 90.

Per poder col·locar el detector de Makrofol dins la cambra de difusió es fabrica en forma de làmines de diferents gruixos, recobertes per una làmina de Mylar⁸ aluminitzat de $3 \mu\text{m}$ de gruix, i es talla en forma de disc de 2.1 cm de diàmetre, veure la **Figura 2.2**. La funció de la làmina de Mylar és evitar la creació de càrrega estàtica a la superfície del detector, fet que podria afectar a la deposició dels productes de desintegració del radó. Al mateix temps l'efecte que produeix és el d'absorbir aproximadament 0.5 MeV de l'energia de les partícules alfa que arriben al detector.

Els components de la cambra de difusió són fets de plàstic elèctricament conductor per evitar una deposició anisòtropa dels descendents del radó a les parets interiors de la cambra i aconseguir, d'aquesta forma, que les partícules α que arriben al detector tinguin una distribució uniforme.

⁷ Hauptabteilung Sicherheit Messstelle für Festkörperdosimeter Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Alemanya. <http://www.fzk.de>

⁸ Fabricat per DuPont Teijin Films, 1 Discovery Drive, Hopewell, VA 23860, EE UU.

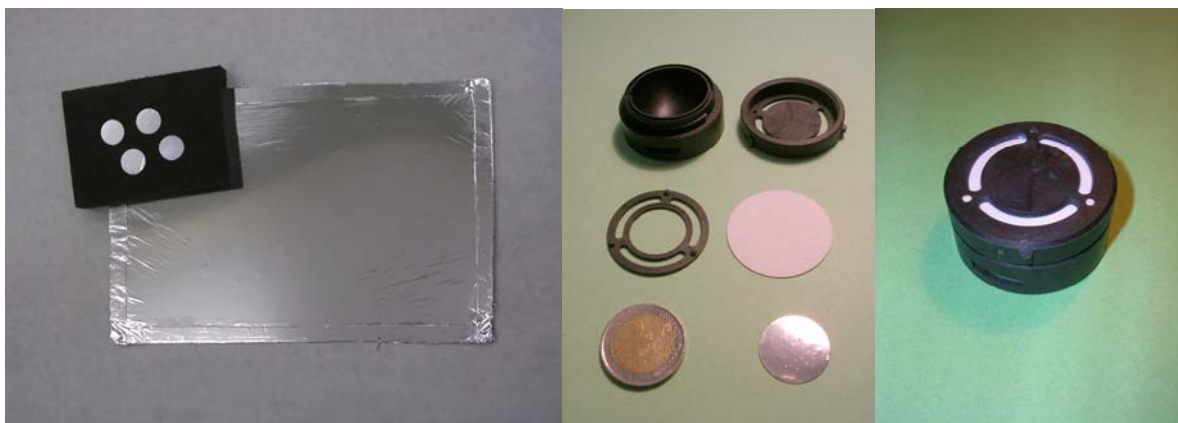


Figura 2.2. Làmina de Makrofol recoberta amb la làmina de Mylar i alguns trossos tallats en forma de disc (imatge esquerra), els diferents components de la cambra de difusió amb un detector de Makrofol (imatge central) i un dosímetre muntat (imatge dreta).

L'aspecte exterior d'aquest dosímetre és el d'un cilindre de 2 cm d'alçada i 4 cm de diàmetre, mentre que el seu interior és una semiesfera de 1.5 cm de radi, en la base de la qual hi ha una peça que subjecta el detector i el filtre. La tapa de la cambra de difusió té unes obertures que permeten l'entrada del radó en el seu interior. Aquesta entrada es fa per difusió a través d'un filtre de fibra de vidre GF6⁹ de 36 mm de diàmetre que es col·loca just sota de la tapa. La seva funció és la de protegir el detector dels aerosols, la pols i la humitat, així com d'evitar l'entrada dels descendents del radó i del toró produïts fora de la cambra de difusió. Aquests descendents, que es poden trobar lliures o bé adherits en les petites partícules de pols o aerosols que hi ha en suspensió a l'aire, queden retinguts a la seva superfície. Si bé a dins de la cambra de difusió només entren aquests dos gasos, amb el pas del temps, també tenim una certa concentració dels seus descendents, que es van desintegrant a mesura que es desintegren els seus pares. Com que el procés de difusió no és instantani, sinó que els gasos tarden una mica en arribar a l'interior de la cambra, es produeix una discriminació del 81 % del toró (²²⁰Rn), degut al seu curt període de semidesintegració (T=55.6 s). Aleshores, el nombre d'àtoms dels seus descendents formats dins la cambra també és menor (Amgarou, 2002).

2.4. El revelatge dels detectors sòlids de traces nuclears (DSTN).

El senyal mesurable que queda registrat en un detector de traces nuclears depèn, essencialment, de tres processos:

1. La deposició d'energia per part de les partícules incidents en el detector en el moment de l'enregistrament. Aquest deposició d'energia governa la formació de la traça latent.
2. L'evolució temporal d'aquesta traça latent un cop registrada i que pot veure's afectada per paràmetres externs del propi detector, tals com les condicions d'emmagatzematge.
3. El procés de revelatge que permet la visualització òptica de la traça latent.

Una descripció detalla del processos de formació i evolució temporal de la traça, així com de la seva transformació durant el revelatge està descrita a Amgarou (1997).

⁹ Fabricat per Schleicher & Schuell MicroScience GmbH, D-37586 Dassel, Alemanya.

2.4.1. El revelatge electroquímic.

El revelatge electroquímic és un mètode de revelatge dels DSTN que combina un atac químic i l'acció d'un camp elèctric oscil·latori intens per tal d'augmentar la mida de les traces registrades en incidir les partícules carregades sobre els detectors. Durant el revelatge electroquímic es perd la informació que podia oferir la traça latent sobre les característiques de la partícula incident. Al final del revelatge les traces latents tenen un aspecte característic que s'assembla a un arbre. En el cas de tenir una densitat de traces elevada es poden produir solapaments entre les traces. També es poden formar traces a partir de les imperfeccions del material anàlogues a aquelles produïdes per les partícules carregades. Les traces que apareixen després del revelatge electroquímic d'un detector no irradiat s'anomenen traces de fons.

2.4.2. Paràmetres importants que influeixen en el revelatge dels DSTN.

Tipus de plàstic detector: Un bon detector ha de tenir una bona sensibilitat i un llindar de registre adequat. També ha de ser homogeni, amb una morfologia uniforme i transparent per facilitar-ne la lectura. S'ha de tenir en compte el gruix, ja que com més gran sigui major serà l'atac químic capaç de suportar abans de trencar-se, però al mateix temps la intensitat del camp elèctric (kV cm^{-1}) serà menor aplicant un mateix voltatge als extrems del detector.

Natura i concentració de la dissolució atacant: L'agent revelador acostuma a ser una dissolució bàsica, normalment Hidròxid de Sodi (NaOH) o Hidròxid de Potassi (KOH), amb unes concentracions que varien des de 2.5 N fins a 8 N. Pels detectors formats per policarbonats la concentració de la dissolució atacant és un paràmetre crític en l'error sistemàtic.

Concentració d'alcohol etílic: Afegir alcohol a les dissolucions reveladores afavoreix el revelat del detector. L'efecte de l'alcohol sobre els ions alcalins de l'agent revelador és facilitar la seva mobilitat, el que provoca l'augment de la velocitat d'atac sobre el detector.

Temperatura del revelatge: La temperatura fa que els ions de la dissolució reveladora tinguin una determinada energia cinètica el que fa variar la seva mobilitat. Per tant, un increment de la temperatura també provoca l'augment de l'atac químic. Les temperatures aplicades solen variar entre els 25 °C i els 70 °C.

Intensitat del camp elèctric: S'aplica un camp elèctric intens de caràcter oscil·latori que produeix fenòmens tèrmics, que afavoreixen l'augment de la velocitat d'atac en la direcció de la traça, i fenòmens elèctrics, que donen lloc a tensions electromecàniques en el polímer i produeixen la ruptura dels seus enllaços. Un augment del camp elèctric, és a dir, un augment del voltatge aplicat comporta un augment de les traces de fons. La intensitat del camp elèctric utilitzada en els revelatges electroquímics sol estar entre 20 i 40 kV cm^{-1} .

Freqüència aplicada: L'efecte de la freqüència del camp elèctric en el revelat electroquímic consisteix en afavorir la formació dels arbres en les traces latents i millorar la sensibilitat del detector. La freqüència aplicada sol tenir valors típics de l'ordre dels kHz.

Durada del revelatge: El temps que dura el revelat és un paràmetre molt important ja que determina el gruix reduït i permet fer una certa espectrometria α , és a dir, discriminar les traces de les partícules α amb energies que no interessa registrar. Normalment aquesta durada és de 4 a 6 hores.

2.5. El revelatge electroquímic utilitzat pels detectors de Makrofol.

2.5.1. El sistema de revelatge.

El sistema de revelatge electroquímic a altes freqüències que utilitza el GFR permet augmentar la mida de les traces produïdes per les partícules alfa incidents sobre el Makrofol. Aquest sistema consta dels següents elements:

- Font d'alimentació alterna d'altres tensió i freqüència PTW-FG5¹⁰, amb els rangs de 200-1600 V per a la tensió eficaç i de 2500-5000 Hz per a la freqüència. Disposa d'un divisor de tensió per poder realitzar la lectura dels paràmetres elèctrics del revelatge electroquímic.

- Freqüencímetre (TEKTRONIX CFC250)¹¹ connectat a un selector. La lectura proporcionada quan el selector està a la posició 1, és 100 vegades el valor del corrent (en mA) que circula pel sistema de cel·les i a la posició 2, és la freqüència (en Hz) aplicada.

- Oscil·loscopi HAMEG HM 103¹² per mesurar la tensió aplicada al sistema de cel·les.

- Estufa Selecta Digitronic¹³ amb circulació forçada d'aire i termòstat per mantenir la temperatura constant i homogènia en el seu interior durant el revelatge. Arriba fins a 200 °C amb una precisió de 0.1 °C.

- Mecanisme de seguretat que atura el subministrament elèctric en cas de produir-se un curtcircuit o quan s'obra la porta de l'estufa durant un revelatge.

- Sistema de cel·les de revelatge: 11 plaques rígides i 20 juntes flexibles, ambdues fabricades amb plàstic PVC i amb uns orificis per col·locar els detectors, 2 plaques d'acer inoxidable i una barra també d'acer. Cadascuna de les plaques rígides està perforada per la part superior per quatre forats que permeten la introducció de la dissolució reveladora i dels elèctrodes, també d'acer inoxidable. Aquest sistema s'ha utilitzat en el GFR des de 1990 i està inspirat en el que s'utilitza en el FzK.

A la **Figura 2.3** apareixen alguns elements del sistema de revelatge: l'estufa a la part inferior, al seu damunt la font d'alimentació i l'oscil·loscopi, i sobre de la font el freqüencímetre. A la **Figura 2.4** apareix el sistema de cel·les del revelatge amb els elèctrodes i els cables connectats.

¹⁰ Fabricada per PTW-Freiburg, Lörracher Str. 7, D-79115 Freiburg, Alemanya.

¹¹ Fabricat per Tektronix Inc. 1500 North Greenville Avenue, Richardson, TX 75081, EEUU.

¹² Fabricat per HAMEG Instruments GmbH, Industriestr. 6, D-63533 Mainhausen, Alemanya.

¹³ Fabricat per J.P Selecta s.a., Carretera Nacional II, km 585, 08630 Abrera (Barcelona), Espanya.



Figura 2.3. Estufa, font d'alimentació i freqüencímetre.

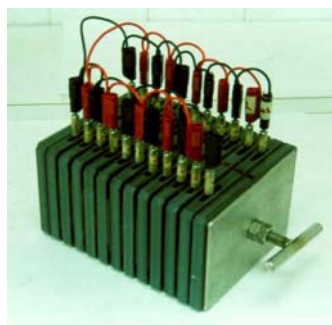


Figura 2.4. Sistema de cel·les.

2.5.2. Les condicions de revelatge utilitzades.

Per tal de registrar les partícules alfa d'energies entre 3.0-5.0 MeV les condicions del revelatge electroquímic utilitzat en aquest treball són:

- Pre-revelatge o revelatge químic:

Temperatura:	40 °C
Agent revelador:	KOH 6 N (1:1) etanol pur-96%
Durada:	4 h
- Revelatge electroquímic:

Temperatura.	40 °C
Durada:	1.5 h
Freqüència:	3 kHz
Intensitat del camp elèctric:	31 kV cm ⁻¹

2.6. El sistema de lectura i anàlisi dels detectors de Makrofol.

El sistema semiautomàtic de recompte de traces que utilitza el GFR pels detectors de Makrofol està format pels següents dispositius:

- Foto vídeo càmera (Sony PHV-A7E)¹⁴ treballant en mode de transmissió.
- Targeta digitalitzadora de gràfics-TV (24-bit Hauppauge WinTV)¹⁵.
- PC Pentium de 300MHz amb 64 Mbytes de Ram i 3.2 Gbytes de disc dur.

¹⁴ Fabricada per Sony Corporation, Tokyo, Japó.

¹⁵ Fabricada per Hiappauge Computer Works Inc., EEUU.

La foto vídeo càmera té un selector Iris que permet controlar la quantitat de llum que arriba al detector de Makrofol i que es transmet al sensor de la càmera. A la **Figura 2.5** apareix la càmera del sistema de lectura i una imatge típica d'un detector de Makrofol després del revelatge electroquímic capturada amb aquesta càmera, on es pot observar que el fons i les traces tenen diferents nivells de gris i les traces tenen diferents mides. El diàmetre més petit que pot observar la càmera és de $12.5\ \mu\text{m}$ (Amgarou, 2002). Col·locant una escala amb unitats de dècimes de mil·límetre al suport dels detectors de la càmera, amb el zoom al màxim, es comprova que la imatge capturada té un camp òptic de $8.4 \times 6.3\ \text{mm}^2$, és a dir, la imatge avarca una superfície del detector de $0.5292 \pm 0.0014\ \text{cm}^2$. Utilitzant el software de control de la targeta WinTV, la foto vídeo càmera captura la imatge del detector amb una resolució espacial de 1600×1200 píxels i aleshores es pot guardar en un directori específic sota qualsevol dels formats de fitxers digitals estàndards com tiff, bmp, jpg, gif, etc. Per altra banda, aquest software també pot ajustar els valors de la lluminositat, el contrast, la saturació i el color. Aquests ajusts, juntament amb el selector Iris de la foto vídeo càmera, permeten l'optimització del reconeixement de les traces i la discriminació de taques, rallades i d'altres inhomogeneïtats indesitjables de la superfície del detector.



Figura 2.5. La foto vídeo càmera del sistema de lectura i anàlisi dels detectors de Makrofol (imatge esquerra) i una imatge típica d'un detector revelat electroquímicament capturada amb aquesta càmera.

El programa d'anàlisi escollit per extreure la informació vital d'aquestes traces és un programa Java processador d'imatges de domini públic anomenat ImageJ¹⁶. Les principals característiques d'aquest programa són:

1. Disposa de totes les funcions estàndards per la millora de la imatge, la reducció del soroll, l'eliminació del fons, la detecció de la vora i identificació de característiques.
2. El seu ús es pot estendre mitjançant connexions Java plug-in de fàcil ús per resoldre la majoria dels problemes d'anàlisi d'imatges i representació de dades complexes.
3. Permet visualitzar simultàniament un gran nombre de finestres d'imatges de detectors o gràfics, limitats només per la memòria disponible de l'ordinador.
4. Ofereix la possibilitat de fer un calibratge paramètric per qualsevol unitat de referència, com per exemple el nivell de gris, i així tenir un enfocament més real de la quantitat mesurada.

¹⁶ Desenvolupat al National Institute of Health (NIH) dels EEUU i disponible de forma gratuïta a: <http://rsb.info.nih.gov/ij>.

3. Mètode experimental.

En aquest capítol es presenta la metodologia emprada amb els DSTN i amb el monitor de radó PRASSI, descrits al capítol anterior. També es fa una descripció detallada del control de qualitat, dels càlculs i de tots els procediments que han permès dur a terme les mesures de la concentració de radó a l'interior de recintes tancats.

3.1. Metodologia emprada amb el monitor de radó PRASSI.

Una descripció detallada de les característiques i especificacions tècniques d'aquest monitor, així com de tots els procediments d'operació es troba en el manual proporcionat per SILENA (1992). Per tal de facilitar el transport d'aquest detector de 15 kg de pes, abans d'iniciar la campanya de mesura, se li va acoblar una estructura amb dues rodes i un tirador.

Per a dur a terme una mesura en continu de la concentració de radó a l'interior d'un recinte tancat és necessari realitzar els següents passos:

1. Col·locar un filtre de fibra de vidre de 47 mm de diàmetre a l'entrada d'aire del monitor.
2. Endollar el detector a la xarxa elèctrica i comprovar el seu funcionament.
3. Comprovar l'estat de la bateria (deixar-la ben carregada en cas de que s'hagi de realitzar la mesura en un lloc sense endolls durant menys de 8 hores).
4. Comprovar l'estat de la memòria interna del detector i fer un buidatge de les dades emmagatzemades per tenir espai suficient per a la nova mesura.
5. Comprovar la data i hora indicades pel detector.
6. Programar els següents paràmetres: el temps d'integració de les mesures, la data i l'hora de l'inici de la mesura, i el temps total que durarà la mesura (opcional).

Un cop finalitzada la mesura es procedeix a descarregar les dades a un ordinador mitjançant el port RS-232. En cas d'haver mesurat concentracions elevades de radó es realitza un flashing per netejar els descendents que s'hagin pogut adherir a les parets interiors de la cambra de detecció.

Amb una mesura en continu de dues hores de durada es pot fer una estimació de l'ordre de magnitud de la concentració de radó en un recinte tancat. En cas de voler estudiar les fluctuacions diàries de la concentració de radó i l'efecte de la ventilació cal deixar el monitor un mínim de 24 h. Al llarg de la campanya de mesura descrita en aquest treball s'han realitzat algunes mesures en continu de la concentració de radó en alguns recintes tancats, que han tingut unes durades compreses entre un dia i dues setmanes. Per la resta de recintes tancats no inclosos en aquest treball, però que han estat mesurats dins el projecte amb el CSN, s'han dut a terme diferents mesures d'unes dues hores de durada. Això ha permès de fer una estimació del temps que es podien deixar exposats els dosímetres de Makrofol sense que quedessin saturats, amb l'objectiu d'obtenir el valor mig anual de la concentració de radó de forma més precisa.

3.2. Metodologia emprada amb els detectors de Makrofol.

3.2.1. Adquisició i emmagatzematge.

Abans de començar la campanya de mesura descrita en aquest treball es va realitzar una nova comanda de detectors de Makrofol de 500 μm de gruix al FzK, per tal de realitzar les mesures de la concentració de radó amb uns detectors que tinguessin un fons baix. Aquests detectors van arribar preparats per a ésser muntats directament a la cambra de difusió, és a dir, venien tallats en forma de làmines circulars de 2.1 cm de diàmetre i amb la capa de Mylar col·locada sobre la cara sensible. Les 2500 unitats sol·licitades van arribar dins uns tubs de plàstic, amb unes 100 unitats cadascun, i dins una gran bossa aluminitzada de Climafol¹ tancada al buit. En el moment de la recepció es van tornar a envasar tots els tubs al buit però de forma individual i es van guardar a la nevera del laboratori del GFR amb nivells baixos de radiació. L'emmagatzematge de tots els detectors fins el moment de la seva utilització sempre ha estat en aquestes condicions per tal de reduir al màxim les traces de fons.

3.2.2. Muntatge dels dosímetres.

Per dur a terme el muntatge dels dosímetres primer cal realitzar un rentat de les cambres de difusió, per tal d'eliminar qualsevol partícula de pols que s'hagi pogut dipositar a la seva superfície. Posteriorment se les sotmet a un rentat amb alcohol, insistint sobretot en la superfície interior de les cambres, per acabar d'eliminar les petites restes de calç i altres partícules dipositades que podrien alterar el resultat de la mesura. La manipulació de tot els elements que configuren el dosímetre (cambra de difusió, detector i filtre) es realitza amb guants de làtex i pinces, per evitar dipositar les empremtes en aquelles parts més delicades, com per exemple la superfície de Mylar del detector o el filtre. El muntatge del suport de dosímetre es du a terme mitjançant una petita eina de plàstic, veure la **Figura 3.1**, especialment dissenyada per encaixar les dues peces que aguanten el detector i el filtre de fibra de vidre (suport i tapa). Un cop finalitzat el muntatge dels dosímetres se'ls col·loca en bosses de polietilè Magic Vac² i, mitjançant el sistema d'envasat Genius², es fa el buit per tal de reduir el contacte amb el radó mentre es transporten fins al punt d'exposició.



Figura 3.1. Muntatge dels dosímetres de Makrofol (imatge esquerra) i emmagatzematge en bosses de polietilè on es fa el buit (imatge dreta).

¹ Fabricat per Hoffmann Verpackung GesmbH, Jeding 24, 5222 Munderfing, Austria.

² Fabricat per Flaem Nuova S.p.A., Via Colli Storici 221-225, 25010 S. Martino della Battaglia (Brescia), Italia.

3.2.3. Revelatge del detectors.

A continuació es descriu tot el procés de revelatge electroquímic dels detectors de Makrofol.

Preparació de les dissolucions.

Per preparar un volum V d'agent revelador KOH amb la normalitat N desitjada a partir de lleties de KOH, amb 85% de puresa, i aigua destil·lada es pot fer servir l'expressió següent:

$$m = \frac{NVM_{KOH}}{0.85} \quad (3.1)$$

on M_{KOH} és la massa molar de la molècula KOH (= 56.11 g).

En dissoldre les lleties de KOH amb l'aigua destil·lada la dissolució s'escalfa molt degut a les reaccions químiques exotèrmiques que es produeixen. Aleshores s'ha de deixar refredar per poder comprovar la normalitat de la dissolució. La valoració es du a terme amb un elèctrode de referència d'un PH-metre que mesura el potencial redox (en mV) de la dissolució. En un vas de precipitats ple d'aigua destil·lada s'hi afegeix, mitjançant una pipeta de 0.01 ml de precisió, un volum $V_{KOH} = 1$ ml de la dissolució preparada. El potencial que indica el PH-metre inicialment és negatiu. A continuació es procedeix a deixar caure gota a gota, mitjançant una bureta de 0.05 ml de precisió, una dissolució HCl de normalitat $N_{HCl} = 1$. El potencial de la dissolució va augmentant fins anul·lar-se i canviar de signe, moment en el qual finalitza la valoració. El volum V_{HCl} (en ml) utilitzat ens indica la normalitat N de la dissolució, és a dir:

$$N = \frac{N_{HCl}V_{HCl}}{V_{KOH}} \quad (3.2)$$

Com que un determinat volum de dissolució serveix per diferents revelats d'una mateixa campanya és necessari controlar la dissolució de forma periòdica realitzant més valoracions.

Per dur a terme el revelatge cal preparar dues dissolucions de KOH, una de 6 N i l'altra de 0.25 N. La primera, mesclada amb etanol, s'utilitza com agent revelador i la segona serveix per tancar el circuit elèctric durant el revelatge electroquímic.

Muntatge del sistema de cel·les.

En el moment en què es vol iniciar un revelatge dels detectors de Makrofol cal preparar el sistema de cel·les. Entre cada dues plaques rígides es col·loquen dues juntes flexibles, entremig de les quals s'hi posen dues làmines de Makrofol. El conjunt queda subjectat entre les plaques d'acer inoxidable i la barra que travessa tot el conjunt de plaques i juntes. Per tenir controlada la distribució dels dosímetres en tot el conjunt de les cel·les, s'han enumerat les diferents posicions dels detectors de l'1 al 20. Les làmines han d'estar situades en els orificis circulars que tenen les juntes i les plaques.

Les superfícies sensibles dels detectors han de quedar orientades cap a les plaques parells del sistema, on posteriorment s'introdueix l'agent revelador.

Pre-escalfament.

Un mínim de 4 hores abans de començar el revelatge, es realitza un pre-escalfament de tots els objectes i dissolucions que hi intervenen amb l'objectiu de que ja estiguin a 40 °C en el moment de començar el revelatge. Els elements que cal posar a escalfar a l'interior de l'estufa són els següents: sistema de cel·les (situat dins una palangana per si vessés la dissolució), elèctrodes i cables, dues provetes, recipient per preparar l'agent revelador, dos dosificadors per col·locar les dissolucions en els orificis de les plaques, i finalment 100 ml de KOH 0.25 N, 50 ml de KOH 6 N i 50 ml d'etanol de 96 % de puresa, en recipients correctament tapats per evitar l'evaporació.

Preparació de la dissolució atacant i inici del revelatge.

Just abans de començar el revelatge es prepara l'agent revelador, és a dir, la mescla del KOH 6 N i l'etanol responsable de l'atac químic. Aquesta mescla s'ha d'agitar bé perquè quedi ben homogènia. A continuació es procedeix a injectar la dissolució KOH de baixa normalitat a les plaques imparells del sistema de cel·les i l'agent revelador a les parells. En el moment que l'agent revelador entra en contacte amb els detectors ja comença el revelatge químic. Després es col·loquen els elèctrodes i es connecten els cables. Finalment es retorna tot el conjunt de cel·les a l'interior de l'estufa. Tot aquest procés s'ha de fer en el menor temps possible per evitar el refredament del sistema i mantenir la reproductibilitat dels resultats. En aquest moment també és aconsellable realitzar una prova del revelatge electroquímic. D'aquesta forma ens assegurem del bon muntatge i del correcte funcionament de tot el sistema de revelatge.

Control del revelatge electroquímic.

Quan han transcorregut les 4 hores de revelatge químic, es procedeix a començar l'electroquímic, connectant la font d'alta tensió i el sistema de lectura de la tensió, el corrent i la freqüència (oscil·loscopi i freqüencímetre). Al llarg de revelatge cal anar controlant els següents paràmetres: la temperatura, la tensió aplicada, la freqüència i el corrent que circula pel sistema. Per això és aconsellable fer una comprovació cada 10 minuts i fer un reajust d'aquests paràmetres si és necessari.

Finalització del revelatge i neteja dels dosímetres.

Quan ha finalitzat el revelatge electroquímic es retira el sistema de cel·les de l'interior de l'estufa i es procedeix al seu desmuntatge. Les plaques i les juntes per un costat i els detectors per l'altre es netegen amb aigua corrent i es deixen assecar. A continuació ja es pot realitzar el recompte de la densitat de traces.

3.2.4. Lectura i anàlisi dels detectors.

Un cop realitzat el revelatge electroquímic dels detectors s'ha de realitzar el recompte de traces mitjançant els diferents components del sistema semiautomàtic de lectura i anàlisi d'imatges, descrits a l'apartat 2.6.

En primer lloc es realitza la captura de les imatges de tots els detectors mitjançant la foto vídeo càmera i després es realitza l'anàlisi de les seves traces mitjançant el programa ImageJ. Per tal de determinar el nombre de traces de cadascuna de les imatges del detector cal convertir la imatge a una del tipus de 8 bits per píxel, per tal de tenir 256 nivells de gris (0 pel píxel totalment negre fins a 255 pel píxel totalment blanc). Aleshores el programa ImageJ defineix automàticament uns llindars de gris que permeten aïllar totalment les traces. Després d'aquest canvi, la imatge del detector té l'aspecte que s'observa a la **Figura 3.2**. El programa també ofereix la possibilitat de visualitzar l'histograma dels nivells de gris per poder quantificar la quantitat de llum que arriba al detector. Aquest histograma presenta dos pics, el més alt correspon als nivells de gris del fons de la imatge i el més baix correspon als nivells de gris de les traces, que és el que interessa mesurar. Finalment es realitza l'anàlisi de les traces i s'obtenen els valors d'un conjunt de característiques (àrea, perímetre, etc) en una llista que es pot exportar per si es vol utilitzar més endavant. A la **Figura 3.2** també apareixen les finestres dels diferents processos que realitza el programa ImageJ. Mitjançant qualsevol programa de càlcul es pot determinar la densitat de traces i fer un anàlisi estadístic de les dades obtingudes.

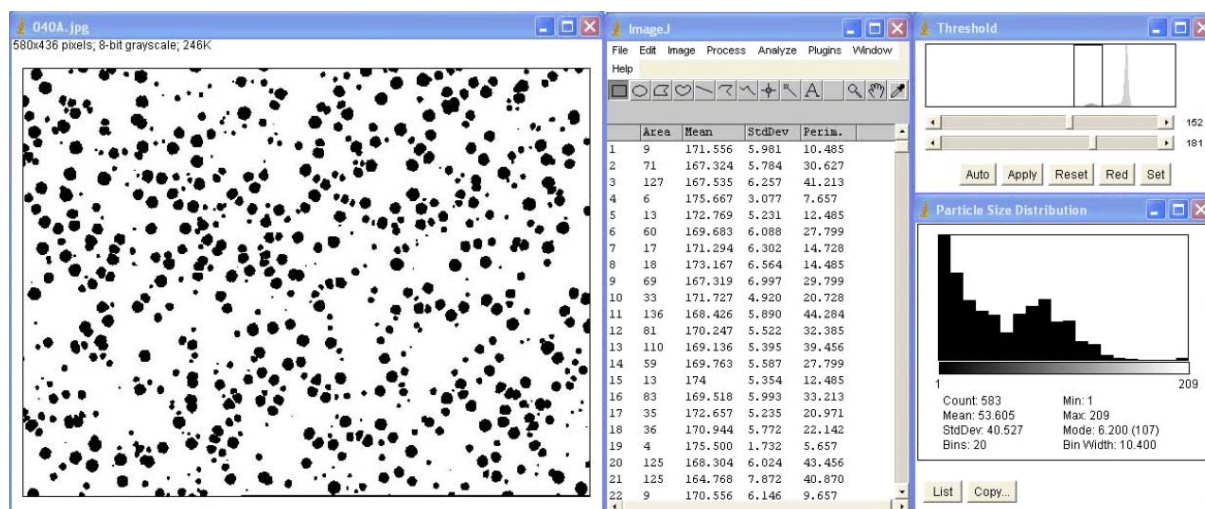


Figura 3.2. Il·lustració dels processos utilitzats pel programa ImageJ per avaluar els detectors de Makrofol sotmesos al revelatge electroquímic. L'histograma dels nivells de gris amb els llindars definits automàticament (veure la finestra superior dreta), la imatge analitzada on apareixen les traces ben distingides del fons (veure la finestra esquerra) i la finestra principal del programa on apareix la llista de les característiques de les traces mesurades (veure la finestra central). Si es requereix també es pot visualitzar un histograma amb la distribució d'àrees de les traces i un resum amb els principals resultats de l'anàlisi (veure la finestra inferior esquerra).

3.3. Control de qualitat de la metodologia emprada amb els detectors de Makrofol.

Abans d'iniciar tota la campanya de mesura es va voler realitzar algunes comprovacions de la reproductibilitat dels resultats obtinguts amb el mètode de mesura dels detectors de Makrofol, és a dir, amb els sistemes de revelatge, lectura i anàlisi d'imatges dels detectors. A continuació es descriuen tots els procediments seguits així com els resultats obtinguts en totes aquestes comprovacions.

3.3.1. Sistema de revelatge.

Un bon procés de revelat ha de proporcionar resultats reproduïble, és a dir, el procediment seguit i els dispositius utilitzats han de proporcionar les mateixes condicions de revelatge en qualsevol moment.

Dissolucions: En general un litre de dissolució serveix per fer més de 10 revelatges però al llarg d'una campanya de mesura el nombre de revelatges que es fan és molt superior a aquesta xifra i això requereix haver de preparar la mateixa dissolució varies vegades. Si sempre es segueix el mateix procediment de preparació i valoració, utilitzant els mateixos productes i materials del laboratori, les dissolucions resultants haurien de ser iguals i, per tant, produir els mateixos efectes sobre els detectors.

Sistema de cel·les: Durant un revelatge, un conjunt de 20 detectors són sotmesos al mateix temps a unes condicions físico-químiques que fan possible la seva lectura i anàlisi posteriors. Si els detectors són iguals i han estat sotmesos a les mateixes condicions d'exposició, és a dir, si són detectors equivalents, la seva resposta no pot dependre, per exemple, de la posició ocupada dins el sistema de cel·les. Anàlogament, si s'han de fer molts revelatges en les mateixes condicions, la resposta d'aquests detectors equivalents també ha de ser la mateixa en els diferents revelatges.

Metodologia.

Per tal de disposar d'un conjunt de detectors exposats a les mateixes condicions es va realitzar una irradiació amb una font d'americí. El material utilitzat, que apareix a la **Figura 3.3**, es descriu a continuació:

- Estructura de fusta fabricada expressament per tal de fer irradiacions de detectors de Makrofol. La base de l'estructura conté una guia amb un paper mil·limetrat per tal de graduar la distància font-detector. La font queda subjectada a una peça de plàstic que es desplaça manualment sobre aquesta base.
- Cronòmetre per tal de controlar el temps que dura la irradiació dels detectors (10 segons).
- Làmina de cartró d'1 mm de gruix, capaç d'aturar totes les partícules α procedents de la font. Es situa entre la font i el detector i serveix per controlar manualment la irradiació dels detectors.
- Font d'americí (^{241}Am) encapsulada en una peça de plàstic transparent. Aquesta font té una activitat de ~ 3.7 kBq i emet partícules α amb una energia de 5.5 MeV, aproximadament com

les del radó (5.49 MeV). Aleshores, l'abast en aire³ de les partícules α emeses per aquesta font és de 4.1 cm.

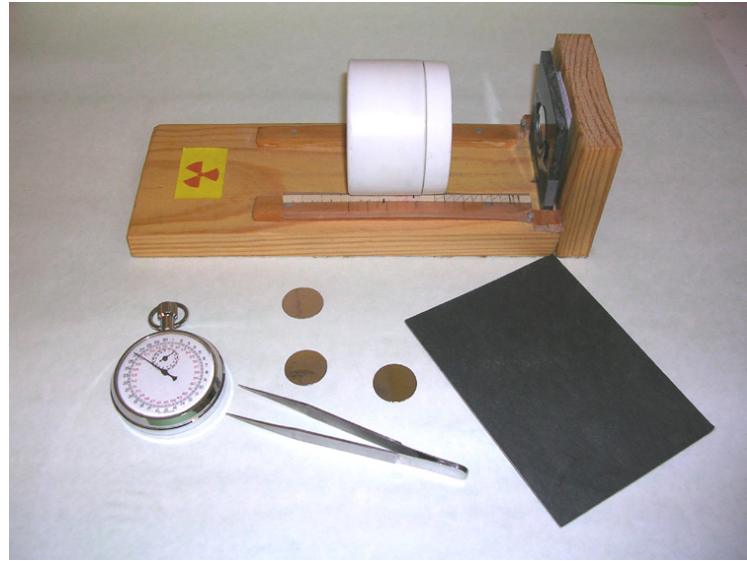


Figura 3.3. Dispositiu utilitzat per realitzar una irradiació dels detectors de Makrofol amb una font d'americi (^{241}Am).

Col·locant el detector a 1 cm de distància de la font, les partícules α emeses per la font arriben al detector amb unes energies màximes compreses entre 4.0 i 4.5 MeV. Aquesta pèrdua d'energia és deguda a la interacció de la partícula α amb l'aire present entre la font i el detector. Tenint en compte que la làmina de Mylar també absorbeix aproximadament 0.5 MeV de la seva energia, aleshores les partícules α arriben a la superfície del detector de Makrofol amb unes energies màximes entre 3.5 i 4.0 MeV i, per tant, produeixen unes traces que podran ser observades aplicant les condicions de revelatge utilitzades.

En total es van irradiar 56 detectors, identificats amb un codi numèric de l'1 al 56 i es van dur a terme 3 revelats, de 20 detectors cadascun. Pels dos primers revelats es va utilitzar una dissolució KOH 6 N que feia poc temps que s'havia preparat i pel tercer revelat se'n va utilitzar una altra d'igual, però que feia més dies que estava preparada. Els detectors amb els codis de l'1 al 20 van ocupar de forma ordenada les 20 posicions del sistema de cel·les, després els detectors del 21 al 40 van ocupar les mateixes posicions i finalment els detectors del 41 al 56. En el tercer revelat es van haver d'agafar 4 detectors de fons per completar el revelat amb els 20 detectors. Mitjançant el sistema de lectura i anàlisi descrit al capítol 2 es van determinar el nombre de traces de tots els detectors.

³ La distància que recorre una partícula α en un medi, abans de perdre tota la seva energia cinètica com a conseqüència d'interaccionar amb els àtoms del medi, es coneix com l'abast mig, R . Com que les partícules α són pesants, la seva trajectòria és aproximadament rectilínia i amb poca fluctuació. La relació empírica entre l'abast R (cm) en aire, a 15 °C i 1 atm, i l'energia cinètica de les partícules α , T_α , d'energies compreses entre 4 i 8 MeV és $R = 0.318 T_\alpha^{3/2}$.

Resultats.

El nombre de traces obtingut per tots els detectors de Makrofol revelats a les 20 posicions del sistema de cel·les en 3 revelatges diferents apareixen a la **Figura 3.4**. Falten els resultats dels detectors 46 i 48 del tercer revelatge que, degut a un mal contacte en uns dels elèctrodes, no van aparèixer traces a la cara sensible del detector. Aquest petit inconvenient es va solucionar fàcilment comprovant totes les connexions dels dos cables que unien els elèctrodes.

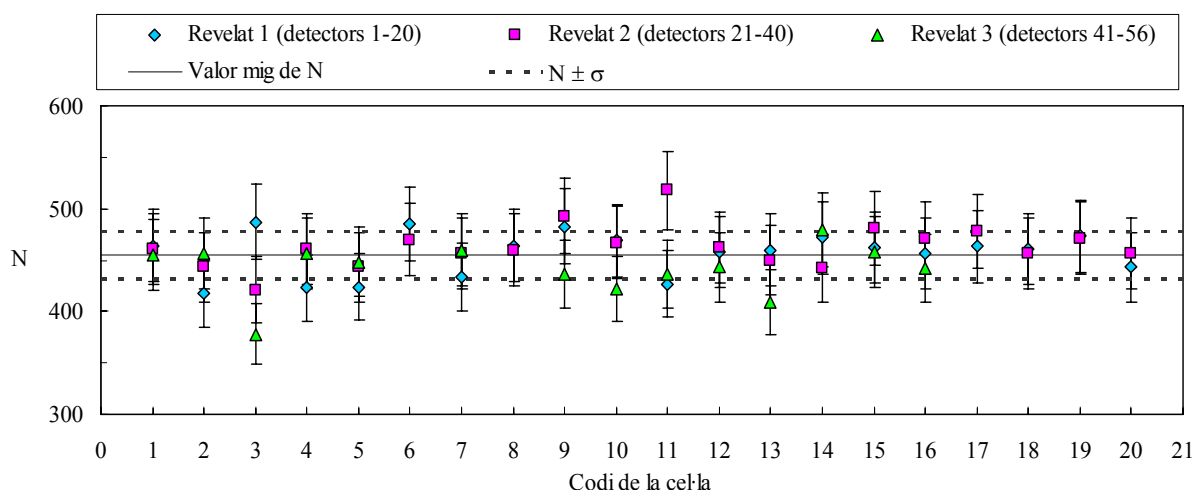


Figura 3.4. Nombre de traces dels detectors de Makrofol sotmesos a les mateixes condicions d'exposició, revelatge, lectura i anàlisi considerant les posicions del sistema de cel·les.

El valor mig del nombre de traces, \bar{N} , i la seva desviació estàndard, σ , obtinguts pel conjunt dels tres revelatges són 455 i 23 respectivament, per tant, es comprova que la majoria dels resultats obtinguts coincideixen dins el rang $\bar{N} \pm \sigma$. Només hi ha dos resultats que s'escapen d'aquest rang, però com que corresponen a les cel·les 11 i 3 dels revelatges 2n i 3r respectivament no demostren cap anomalia en el sistema. Aquestes fluctuacions podien haver estat produïdes durant la irradiació del detector amb la font, degut a l'aleatorietat del procés de desintegració radioactiva, a la dispersió de les partícules α per les interaccions amb els àtoms de l'aire i a l'adsorció a la capa de Mylar. Per tant, amb aquesta comprovació es va poder concloure que el sistema de revelatge complia les condicions de reproductibilitat.

3.3.2. La velocitat d'atac superficial.

La velocitat d'atac superficial és el gruix de detector que es veu atacat per unitat de temps durant tot el revelatge electroquímic dels DSTN. Les partícules α de 5.49 MeV tenen un abast en Makrofol de 36.4 μm però no totes les partícules α que arriben a la superfície del detector tenen aquesta energia, pels motius esmentats anteriorment. El GFR havia optimitzat les condicions de revelatge dels detectors de Makrofol de 300 μm per tal poder registrar les partícules α del radó amb unes energies compreses entre 3 i 5 MeV (Garcia, 1990). Amb aquestes condicions la velocitat superficial d'atac resultava ser de $\sim 4 \mu\text{m h}^{-1}$ (Amgarou, 1997), el què representa que durant les 4 hores del pre-revelatge el gruix reduït en les làmines de Makrofol era d'un 16 μm , aproximadament.

Durant el revelatge electroquímic dels detectors de Makrofol es produeix un augment tant important de la mida de les traces, en forma d'arbres, que pot arribar a provocar el trencament del dielèctric i produir un curtcircuit. Això és el què passava inicialment quan es treballava amb detectors de 300 μm . Per tal d'eliminar aquesta possibilitat de curtcircuits, el GFR va passar a treballar amb detectors de Makrofol de 500 μm i, aleshores, va caldre realitzar un ajust de les condicions del revelat estàndard. No es va poder augmentar la tensió per mantenir el valor de la intensitat del camp elèctric a 33 kV cm^{-1} , ja que la font d'alta tensió no podia superar els 1600 V i, aleshores, es va passar a un valor de la intensitat del camp elèctric de 31 kV cm^{-1} . A partir d'aquell moment ja es van utilitzar sempre les mateixes condicions de revelat en tots els detectors utilitzats.

La velocitat d'atac superficial no depèn de la mateixa forma dels diferents paràmetres que intervenen en el revelat, descrits a l'apartat 2.4.2, (Garcia, 1990; Font 1993). En principi, és independent de la tensió i freqüència aplicades i del temps de revelat però, en canvi, depèn fortament de la temperatura, del percentatge d'alcohol en la dissolució atacant i del tipus d'agent revelador. Tot i que era d'esperar que, després del canvi de gruix i del conseqüent canvi en la tensió aplicada, la velocitat d'atac del detector continués sent la mateixa, es va decidir fer la comprovació corresponent. A continuació es descriu el procediment seguit per determinar la velocitat d'atac i comprovar el valor de la intensitat del camp elèctric.

Metodologia.

La velocitat superficial d'atac es calcula a partir del gruix reduït i del temps total del revelat. El gruix reduït és la diferència entre el valor mig del gruix de les làmines abans de ser revelades i el seu corresponent gruix mig després de ser revelades. El gruix de les làmines es determina amb la galga inductiva Millitron Feinprüf⁴ de precisió 0.1 μm que es mostra a la **Figura 3.5**.



Figura 3.5. Galga inductiva Millitron Feinprüf⁵ de precisió 0.1 μm utilitzada per determinar el gruix dels detectors de makrofol abans i després del revelatge.

⁴ Fabricada per Feinprüf GmbH, 37008 Göttingen, Alemanya.

⁵ Fabricada per Feinprüf GmbH, 37008 Göttingen, Alemanya.

Es van agafar 27 detectors de fons i se'ls va treure la làmina de Mylar. Per obtenir el gruix inicial es va col·locar la galga a 5 posicions diferents de la superfície de cada detector i per obtenir el gruix final es van realitzar 5 mesures més, però aquest cop a la zona central del detector, que havia estat revelada utilitzant les condicions de revelat descrites a l'apartat 2.5.2.

Resultats.

El valors mitjos obtinguts amb els 27 detectors mesurats són els següents:

Gruix abans del revelatge químic:	$(500 \pm 1) \mu\text{m}$
Gruix després del revelatge electroquímic (5.5 h):	$(480 \pm 1) \mu\text{m}$
Gruix total atacat (durant 5.5 h):	$(20 \pm 1) \mu\text{m}$
Velocitat d'atac superficial:	$(3.6 \pm 0.2) \mu\text{m h}^{-1}$

El valor de la velocitat d'atac superficial coincideix amb el que s'havia obtingut amb les condicions de revelatge dels detectors de $300 \mu\text{m}$ ($\sim 4 \mu\text{m h}^{-1}$ (Amgarou, 1997)), per tant, podem estar segurs de que s'estan detectant les partícules α del radó amb unes energies compreses entre 3 i 5 MeV.

Durant les 4 hores que dura el pre-revelatge o revelatge químic es produeix un atac de $(14 \pm 1) \mu\text{m}$, per tant, el gruix del detector després de les 4 hores de revelatge químic és de $(486 \pm 1) \mu\text{m}$. Com que la tensió aplicada en el revelatge electroquímic és de 1500 V, aleshores es confirma que la intensitat del camp elèctric és de 31 kV cm^{-1} .

3.3.3. Sistema de Lectura

La foto vídeo càmera utilitzada en el sistema semiautomàtic de recompte de traces disposa d'un comandament que controla l'iris i permet seleccionar la intensitat de llum amb la que es vol il·luminar el detector. El fet de que aquest comandament no tingui una escala graduada representa un inconvenient a l'hora de reproduir les mateixes condicions de llum per totes les lectures dels detectors utilitzats en una campanya. Es va voler veure si la intensitat de llum que proporcionava la càmera per defecte corresponia a les condicions més favorables per la lectura dels detectors de Makrofol. Posteriorment a aquesta comprovació es va fer una optimització de les condicions de lectura dels detectors.

Metodologia.

Primer es va fer la comprovació utilitzant un detector irradiat amb la font d'Americi i revelat electroquímicament. Se'l va col·locar al suport de la càmera per fer la lectura de les traces i es va anar ajustant el comandament de l'iris per tal d'obtenir un total de 14 imatges amb diferents intensitats de llum. A continuació es va fer el recompte de traces amb el programa ImageJ i es va observar com variava el nombre de traces al llarg de la seqüència d'imatges. Com que amb el detector irradiat totes les traces tenien aproximadament la mateixa mida, degut a que totes les partícules α que havien arribat a la seva superfície tenien aproximadament la mateixa energia, es va voler repetir la comprovació amb

un detector que tingués una distribució de traces de diferents mides, tal i com passa en els detectors exposats en vivendes. Per tant, es va agafar un detector que hagués estat exposat a l'interior d'un recinte tancat amb una determinada concentració de radó i que s'hagués sotmès a un revelatge electroquímic amb les mateixes condicions. Es van obtenir 28 imatges del mateix detector, també amb diferents intensitats de llum, i es van analitzar de forma anàloga. També es va determinar el nivell de gris mig corresponent a les traces per cadascuna de les imatges i a continuació es va observar com variava el nombre de traces en funció del nivell de gris de les traces.

Resultats.

La seqüència d'imatges del detector irradiat amb la font d'Americi captades per la càmera amb intensitats de llum decreixents apareix a la **Figura 3.6**. A la **Figura 3.7** està representat el nombre de traces obtingut amb el programa ImageJ per cadascuna de les imatges d'aquest detector. Els resultats de les dues primeres imatges i el de la última no estan representats perquè no es llegeix cap traça. Les condicions de lluminositat més favorables per la lectura amb el nostre sistema havien de ser aquelles en que el comportament de la càmera fos el més estable possible, és a dir, les condicions en que el nombre de traces fos el màxim d'independent del grau d'obertura d'iris. A partir dels resultats obtinguts es va comprovar que aquesta situació tenia lloc en l'interval de les imatges 6-9. Com que l'obertura d'iris que té la càmera per defecte quan es posa en funcionament, proporciona una intensitat de llum equivalent a la obtinguda a la Imatge 5, es va comprovar que no eren les condicions de llum més adequades per la lectura dels detectors. Això va motivar la repetició de la comprovació amb un detector que hagués estat exposat a una concentració de radó real per tal de determinar de forma més precisa les millors condicions de lluminositat per la lectura dels detectors.

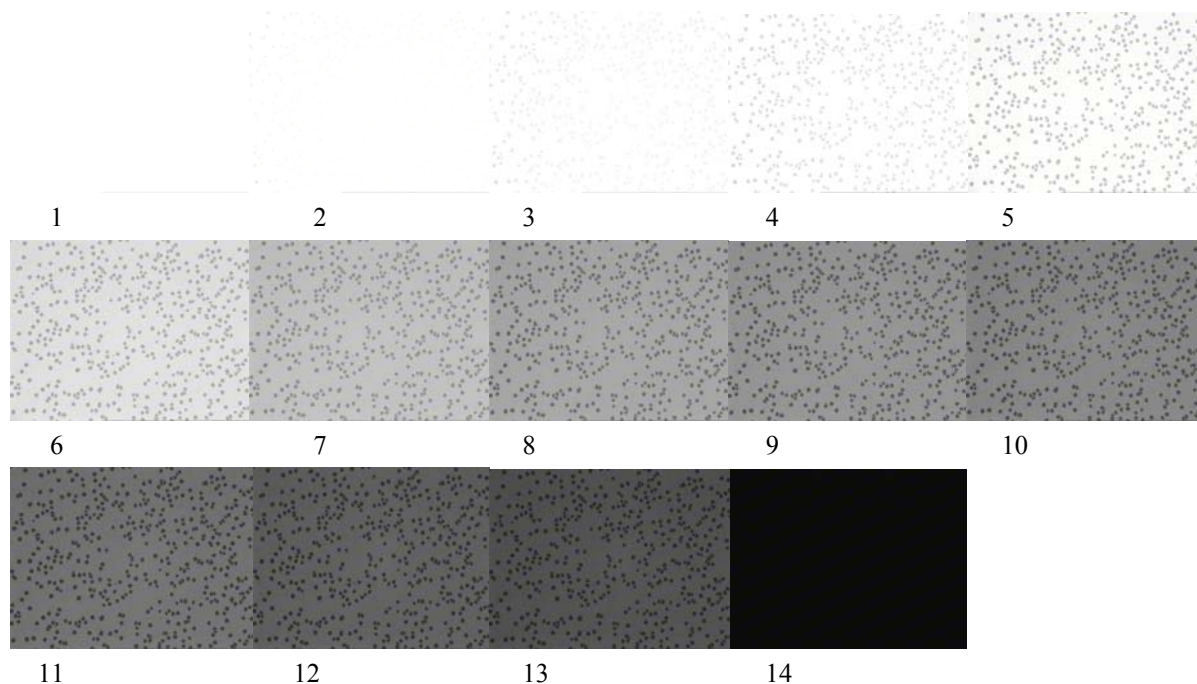


Figura 3.6. Diferents imatges d'un mateix detector de Makrofol, irradiat amb la font d'Americi, captades per la càmera amb diferents intensitats de llum.

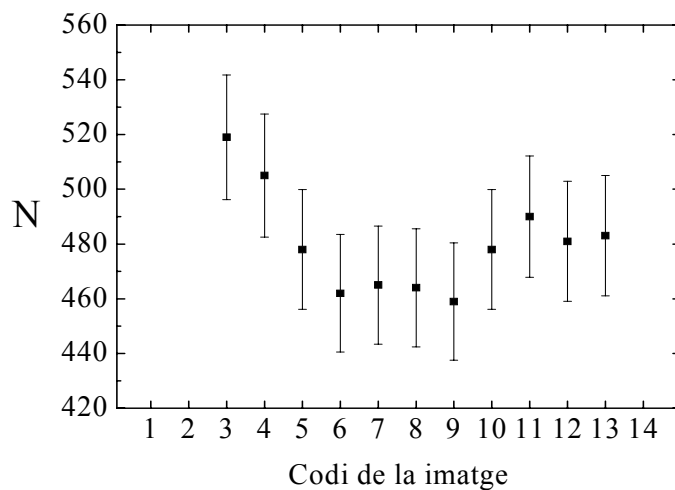


Figura 3.7. Nombre de traces per cadascuna de les imatges del detector irradiat amb la font d'Americi.

El nombre de traces en funció del nivell de gris obtinguts amb el programa ImageJ per cadascuna de les 28 imatges del detector exposat a una concentració de radó real apareixen a la **Figura 3.8**. Es comprova que en funció dels nivells de gris de les traces de les diferents imatges del detector el nombre de traces varia en el rang 425-500, el què suposa una variació superior al 15 % en el nombre de traces. Tal i com es va observar amb la primera comprovació existeixen unes condicions de llum per les quals el nombre de traces es manté aproximadament constant, amb un rang de valors entre 468-485 i, per tant, una variació inferior al 4 %. Aquestes condicions coincideix amb l'interval de nivells de gris de 130 a 170.

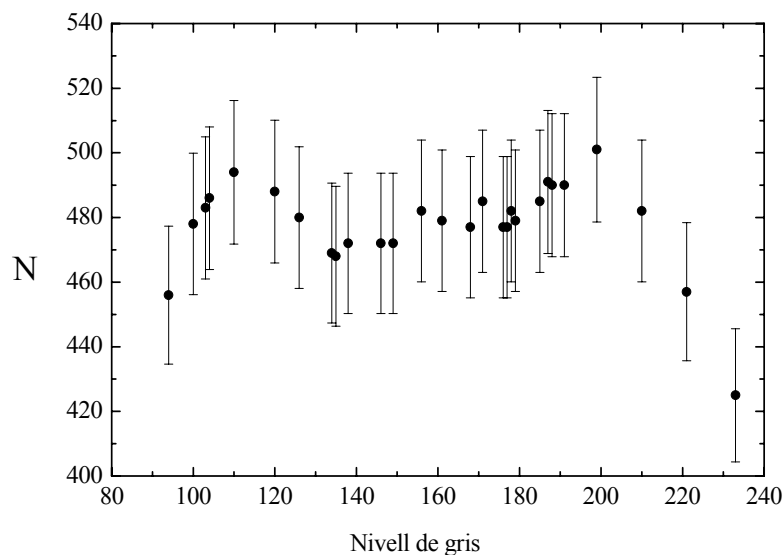


Figura 3.8. Nombre de traces en funció del nivell de gris obtingut amb el programa ImageJ i corresponents un mateix detector exposat a una concentració de radó real, revelat electroquímicament i llegit amb 28 intensitats de llum diferents.

Per tal de no haver de repetir aquest anàlisi cada vegada que es volgués fer una lectura de detectors, es van guardar en un fitxer les dues imatges del detector per les quals els nivells de gris de les traces corresponien als dos extrems d'aquest interval. No es va escollir un nivell de gris concret perquè amb el comandament de què disposa de càmera no és possible seleccionar amb facilitat la intensitat de llum corresponent.

Aleshores, el mètode utilitzat per reproduir les millors condicions de lectura de forma ràpida i segura consisteix en:

- Visualitzar en el monitor de l'ordinador les dues imatges guardades i la imatge proporcionada per programa WinTV, corresponent al detector que es vol llegir.
- Ajustar manualment la intensitat de llum que arriba al detector, mitjançant el comandament de la càmera, procurant que la intensitat de llum seleccionada proporcionï una imatge del detector amb un nivell de gris intermig als de les dues imatges guardades.

D'aquesta forma es va fer una optimització de les condicions de lectura i del procés per determinar-les.

3.4. Determinació de la concentració de radó i la incertesa associada a les mesures amb els DSTN.

A continuació es descriuen tots els procediments seguits i càlculs realitzats per tal de determinar la concentració de radó a l'interior de recintes tancats a partir de les traces registrades en els detectors de Makrofol. En primer lloc es determina la densitat de traces de fons i de trànsit i a continuació s'estima la incertesa associada a tot el procés de mesura per tal d'expressar correctament el resultat final de la concentració de radó amb les seves corresponents incerteses.

3.4.1. Determinació de la densitat de traces de fons i de trànsit.

A totes les traces registrades en detectors no exposats al radó però sotmesos a un revelatge electroquímic se les anomena traces de fons. Aquestes traces poden ser degudes a les imperfeccions del propi material i a partícules ionitzants no controlades que hagin interaccionat amb el detector abans de que aquest hagi estat exposat. Per altra banda, els detectors de trànsit són un conjunt de detectors que acompanyen als que han de ser exposats per tal de controlar la densitat de traces acumulada durant el transport des del laboratori fins al punt de mesura i durant el viatge de retorn al laboratori.

Si tenim un conjunt de n detectors, exposats, revelats i llegits en les mateixes condicions es pot calcular el valor mig del nombre de traces \bar{N} a partir de l'expressió:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (3.3)$$

on N_i és el valor del nombre de traces dels detector i .

Per determinar la incertesa en el valor mig del nombre de traces s'escull entre fer una avaluació de tipus A o de tipus B. Quan el nombre de detectors és gran ($n > 30$) la més adequada és l'avaluació de tipus A, és a dir, s'assumeix que tots els possibles valors segueixen una distribució de probabilitat normal i que la incertesa experimental total és la seva desviació estàndard, σ_{eN} , obtinguda a partir de l'expressió:

$$\sigma_{eN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{N} - N_i)^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

La desviació estàndard experimental del valor mig del nombre de traces de fons es calcula a partir de l'expressió:

$$\sigma_{e\bar{N}} = \frac{\sigma_{eN}}{\sqrt{n}} \quad (3.5)$$

En canvi, quan n és petit, esdevé igualment adequada l'avaluació tipus A com la tipus B. L'avaluació d'incertesa tipus B consisteix en assumir que el fenomen de la desintegració radioactiva segueix una determinada distribució de probabilitat; en aquest cas la de Poisson i, per tant, la incertesa teòrica és la desviació estàndard d'aquesta distribució, és a dir, l'arrel quadrada del valor mig del nombre de traces:

$$\sigma_{tN} = \sqrt{\bar{N}} \quad (3.6)$$

Anàlogament, la desviació estàndard teòrica del valor mig del nombre de traces de fons es calcula a partir de l'expressió:

$$\sigma_{t\bar{N}} = \frac{\sigma_{tN}}{\sqrt{n}} \quad (3.7)$$

En el cas de tenir un nombre de detectors petit l'opció conservadora d'expressar la incertesa del valor mig consisteix en comparar les incerteses obtingudes en les dues avaluacions i escollir aquella que compleixi:

$$\delta\bar{N} = \max[\sigma_{e\bar{N}}, \sigma_{t\bar{N}}] \quad (3.8)$$

Com que ens interessa treballar amb densitats de traces, el valor mig de la densitat de traces es calcula a partir de :

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{N}}{A} \quad (3.9)$$

on \bar{N} és el valor mig del nombre de traces i A és l'àrea mesurada en el detector ($0.5292 \pm 0.0014 \text{ cm}^2$). La incertesa de la densitat de traces s'obté realitzant propagació d'incerteses de l'expressió (3.9) tal com s'indica a continuació:

$$\delta\bar{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial\bar{N}}\delta\bar{N}\right]^2 + \left[\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial A}\delta A\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{\delta\bar{N}}{A}\right]^2 + \left[\frac{\bar{N}\delta A}{A^2}\right]^2} \quad (3.10)$$

Metodologia.

Al llarg de la campanya s'han anat realitzant diferents revelats de detectors no exposats al radó per determinar la densitat de traces de fons i comprovar si es produïa un increment significatiu del seu valor al llarg dels mesos. A l'hora de realitzar el muntatge dels dosímetres que serien exposats també es preparaven alguns dosímetres de trànsit per controlar que la densitat de traces acumulada en el transport no fos molt diferent de la densitat de traces de fons. Com que el nombre de detectors de fons, n_0 , era superior a 30, es va fer una avaluació tipus A per determinar la incertesa del nombre de traces de fons. En el cas dels detectors de trànsit, com que $n_t < 30$, es van fer les dues avaluacions i comparant les incerteses i es va escollir la més gran, segon l'expressió (3.8).

Resultats.

Les densitats de traces mitges dels detectors de fons revelats en diferents moments al llarg de la campanya apareixen a la **Taula 3.1** i a la **Taula 3.2** apareixen el nombre de detectors, el valor mig del nombre de traces i de la densitat de traces per cada tipus de detectors (fons i trànsit), així com els resultats de les avaluacions d'incertesa en cada cas.

Taula 3.1. Valor mig de la densitat de traces dels detectors de fons revelats en diferents moments al llarg de la campanya.

Data del revelat	$\bar{\rho}$ (tr cm ⁻²)
Juny 2004	9 ± 1
Novembre 2004	7 ± 1
Gener 2005	6 ± 1
Març 2005	9 ± 1
Juny 2005	8 ± 1
Juliol 2005	13 ± 1
Novembre 2005	6 ± 1
Gener 2006	6 ± 3
Juny 2006	11 ± 1

Taula 3.2. Tots els resultats parcials i finals de les determinacions de les densitats de traces de fons i trànsit.

Tipus de detectors	Fons	Trànsit	
Nombre de detectors	$n_0 = 57$	$n_t = 8$	
Tipus d'avaluació d'incerteses	A	A	B
Desviació estàndard	$\sigma_{eN_0} = 2.0 \text{ tr}$	$\sigma_{eN_t} = 1.5 \text{ tr}$	$\sigma_{tN_t} = 2.2 \text{ tr}$
Desviació estàndard del valor mig	$\sigma_{e\bar{N}_0} = 0.3 \text{ tr}$	$\sigma_{e\bar{N}_t} = 0.5 \text{ tr}$	$\sigma_{t\bar{N}_t} = 0.8 \text{ tr}$
Nombre mig de traces	$\bar{N}_0 = (4.4 \pm 0.3) \text{ tr}$	$\bar{N}_t = (4.6 \pm 0.8) \text{ tr}$	
Densitat de traces	$\bar{\rho}_0 = (8.3 \pm 0.5) \text{ tr cm}^{-2}$	$\bar{\rho}_t = (8.7 \pm 1.4) \text{ tr cm}^{-2}$	

Es va comprovar que no es produïa cap increment significatiu de la densitat de traces de fons al llarg de la campanya i que la densitat de traces dels detectors de trànsit coincidia amb la dels detectors de fons, dins el rang d'incertesa. Això volia dir que el fet de preparar els dosímetres just abans de la seva distribució i fer el buit amb les bosses de polietilè Magic Vac és una bona metodologia.

3.4.2. Determinació de la incertesa sistemàtica del mètode de mesura.

Quan tenim un nombre n de detectors exposats amb un valor mig del nombre de traces \bar{N} i les incerteses obtingudes amb els dos tipus d'avaluació d'incerteses (tipus A i tipus B) no coincideixen, com es comprova amb els detectors de trànsit, es posa de manifest l'existència d'altres components d'incertesa. Aquests components estan relacionats amb el propi mètode de mesura i en alguns casos poden esdevenir importants i difícils d'avaluar. En el nostre cas estan relacionats amb tot el procés de revelatge, lectura i anàlisi dels detectors. Tots aquests efectes sistemàtics incontrolats dels que no se'n té un coneixement suficient com per aplicar una correcció es poden tractar com una incertesa addicional al resultat de la mesura, anomenada incertesa sistemàtica del mètode de mesura. Una manera d'avaluar aquest component d'incertesa consisteix en considerar que també segueix una distribució de probabilitat, la desviació estàndard de la qual, també anomenada incertesa sistemàtica, σ_s , es calcula comparant la incertesa experimental total, σ_e , amb la incertesa teòrica, σ_t , a partir de l'expressió:

$$\sigma_e^2 = \sigma_t^2 + \sigma_s^2 \quad (3.11)$$

Metodologia.

Es va avaluar la incertesa associada al mètode de mesura considerant un conjunt de 70 detectors separats en 7 grups de 10. Tots els detectors d'un mateix grup havien estat sotmesos a les mateixes condicions d'exposició, i el conjunt dels 70 detectors es va sotmetre a les mateixes condicions de revelat i lectura. Per cada grup es va calcular la seva incertesa sistemàtica relativa i es va considerar que la incertesa sistemàtica del mètode de mesura corresponia al valor mig dels valors obtinguts pels diferents grups.

Resultats.

A la **Taula 3.3.** apareixen tots els resultats del càlcul de la incertesa sistemàtica. Es va obtenir una incertesa sistemàtica relativa del 5.9 %. Tenint en compte que amb els detectors de traces nuclears es procura que les incerteses relatives teòriques de les densitats de traces no superin el 10 %, es comprova que la incertesa sistemàtica associada al mètode de mesura representa un increment significatiu a la incertesa del resultat final de la mesura.

Taula 3.3. Resultats de la determinació de la incertesa sistemàtica del mètode de mesura pels detectors de Makrofol.

Grup	1	2	3	4	5	6	7
N	125	115	225	215	783	974	925
	145	141	177	211	770	942	921
	119	120	206	186	749	857	979
	117	149	217	219	845	882	945
	149	120	238	236	779	840	934
	98	96	208	239	702	836	970
	119	111	187	222	794	844	964
	123	151	262	219	766	861	966
	134	128	196	241	751	882	1013
	125	124	221	251	715	865	1008
\bar{N}	125	125	214	224	765	878	962
σ_e	15	17	25	19	41	46	32
S_e	0,12	0,14	0,12	0,08	0,05	0,05	0,03
σ_t	11	11	15	15	28	30	31
S_t	0,09	0,09	0,07	0,07	0,04	0,03	0,03
S_s	0,08	0,10	0,09	0,05	0,04	0,04	0,01
\bar{S}_s	0,059						

3.4.3. Càlcul de la densitat de traces neta a partir d'un sòl detector exposat.

Quan tenim un sol detector exposat, $n=1$, el valor mig del nombre de traces coincideix amb el seu nombre de traces, $\bar{N} = N$, però a partir d'aquest valor no es pot determinar cap incertesa experimental. Si es fa una avaluació tipus B i només es considera la seva incertesa teòrica, σ_t , s'està menyspreant tota la incertesa del mètode de mesura, σ_s , que també és important. Per tant, el càlcul correcte de la incertesa experimental del nombre de traces per una mesura individual té la següent expressió:

$$\delta N = \sigma_e = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_s^2} \quad (3.12)$$

on σ_t i σ_s es calculen a partir de les expressions:

$$\sigma_t = \sqrt{N} \quad (3.13)$$

$$\sigma_s = S_s N \quad (3.14)$$

i S_s és la incertesa relativa sistemàtica associada al procés de revelatge, lectura i anàlisi, calculada anteriorment.

La densitat de traces d'un detector exposat es calcula dividint per l'àrea A mesurada en el detector ($0.5292 \pm 0.0014 \text{ cm}^2$) i la seva incertesa s'obté realitzant propagació d'incerteses:

$$\delta\rho = \sqrt{\left[\frac{\delta N}{A}\right]^2 + \left[\frac{N\delta A}{A^2}\right]^2} = \sqrt{\frac{N + S_s^2 N^2}{A^2} + \left[\frac{N\delta A}{A^2}\right]^2} \quad (3.15)$$

La densitat de traces neta es calcula restant el valor mig de la densitat de traces de fons al valor de la densitat de traces mesurada en el detector:

$$\rho_n = \rho - \bar{\rho}_0 \quad (3.16)$$

i la incertesa de la densitat de traces neta és:

$$\delta\rho_n = \sqrt{[\delta\rho]^2 + [\delta\bar{\rho}_0]^2} \quad (3.17)$$

Com que no es va observar cap diferència significativa entre la densitat de traces dels detectors de trànsit respecte la dels detectors de fons, per determinar les densitats de traces netes dels detectors exposats sempre es va utilitzat el valor de la densitat de traces de fons obtingut anteriorment.

3.4.4. Càlcul de la concentració de radó.

La magnitud física que mesuren els detectors plàstics és la integral temporal de la concentració real de radó, és a dir, l'exposició:

$$\chi_{Rn} = \int_0^T C_{Rn}(t) dt \quad (3.18)$$

on $C_{Rn}(t)$ és la concentració de radó a l'instant t i T és el temps d'exposició del dosímetre. Les seves unitats són el Becquerel per metre cúbic i hora ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$).

L'exposició es determina a partir de la densitat de traces i del factor de calibratge ε ($\text{tr cm}^{-2} (\text{Bq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$), que ens diu la densitat de traces registrades pel detector per unitat d'exposició. La seva expressió és:

$$\chi_{Rn} = \varepsilon^{-1} \rho_n \quad (3.19)$$

La incertesa de l'exposició s'obté novament propagant incerteses:

$$\delta\chi_{Rn} = \sqrt{\left(\frac{\delta\rho_n}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\rho_n \delta\varepsilon}{\varepsilon^2}\right)^2} \quad (3.20)$$

Aleshores, coneixent el temps d'exposició t (en hores) del dosímetre es pot calcular la concentració de radó mitja a la que ha estat sotmès.

$$C_{Rn} = \frac{\chi_{Rn}}{t} \quad (3.21)$$

Finalment la incertesa de la concentració també es calcula aplicant la propagació d'incerteses:

$$\delta C_{Rn} = \sqrt{\left(\frac{\delta\chi_{Rn}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\chi_{Rn} \delta t}{t^2}\right)^2} \quad (3.22)$$

D'aquesta forma es tenen en compte totes les quantitats que poden intervenir en la incertesa del resultat final (nombre de traces, àrea del detector, densitat de traces de fons, factor de calibratge i temps d'exposició).

A partir dels resultats obtinguts en diferents períodes d'exposició es calcula el valor mig anual de la concentració de radó. Si cada període no té exactament la mateixa durada, s'ha de tenir en compte el pes dels dies de cada període d'exposició sobre el resultat final. Aleshores s'utilitza l'expressió següent:

$$C_{Rn} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Rni} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3.23)$$

on $\{C_{Rn_1}, C_{Rn_2}, \dots, C_{Rn_n}\}$ és el conjunt de les concentracions de radó dels n períodes i $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ és el conjunt dels nombres de dies d'exposició de cadascun dels n períodes.

Per calcular el valor mig de les concentracions anuals de radó obtingudes per un conjunt de recintes que tenen alguna característica en comú s'utilitza l'expressió de la mitja aritmètica:

$$\overline{C_{Rn}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (3.24)$$

on $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ és el conjunt de valors de la concentració mitja anual de radó dels n recintes estudiats.

Per expressar la incertesa del valor mig d'un conjunt de concentracions existeixen varies opcions, en funció de la informació que volem proporcionar:

- Si volem donar la dispersió de valors al voltant del valor mig podem:
 - posar el rang de valors $[\min, \max]$ o bé,
 - calcular de desviació estàndard experimental $\sigma_{eC_{Rn}}$.
- Si volem donar la incertesa en la determinació del valor mig també tenim dues opcions, en funció del nombre n de mesures:
 - fer l'avaluació d'incertesa tipus A i utilitzar la desviació estàndard experimental del valor mig $\sigma_{e\overline{C_{Rn}}}$
 - fer l'avaluació d'incertesa tipus B i aplicar el mètode de propagació d'incerteses.

En aquest treball s'han tingut en compte les dues opcions. Com que el nombre de períodes d'exposició en un recinte concret és igual o inferior a 4, la incertesa del valor mig anual de la concentració de radó s'ha calculat fent la propagació de les incerteses de l'expressió (3.23). Per expressar el valor mig d'un conjunt de recintes amb alguna característica en comú s'ha proporcionat el rang de valor de la concentració de radó i s'ha calculat la incertesa en la seva determinació utilitzant la desviació estàndard del valor mig.

En cas de tenir un conjunt de valors de la concentració de radó que s'ajustin a una distribució lognormal és més adequat proporcionar el valor de la mitja geomètrica, el qual es calcula a partir de l'expressió:

$$(\overline{C_{Rn}})_g = \left(\prod_{i=1}^n C_i \right)^{1/n} \quad (3.25)$$

La desviació estàndard geomètrica es calcula a partir de l'expressió:

$$\sigma_g = \exp \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln C_i - \ln (\overline{C_{Rn}})_g \right)^2}{n}} \right) \quad (3.26)$$

3.4.5. Límit inferior de detecció.

Com que tenim un sistema de mesura completament determinat es pot definir un límit inferior de detecció com la densitat mínima de traces induïda per la radiació incident capaç d'ésser mesurada amb el sistema (Currie, 1999b). Aquest límit es pot calcular a partir de l'expressió simplificada donada per la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada (IUPAC),

$$L_D = 4.26 \sigma_0 \quad (3.27)$$

on σ_0 és la desviació estàndard del fons, ja que es compleixen les condicions d'aplicabilitat d'aquesta relació (acceptant la hipòtesis nul·la, tenint una densitat de traces de fons ben determinada, amb una distribució normal de valors i una desviació estàndard σ_0 constant, etc.) (Currie, 1999a).

El valor obtingut pel límit inferior de detecció és de 16 tr cm⁻². Utilitzant el factor de calibratge ϵ , obtingut a l'apartat 3.5.2, es determina el nivell mínim d'exposició detectable i per obtenir la concentració mínima detectable es divideix pel temps d'exposició. En el cas d'una exposició típica de 3 mesos la concentració de radó mínima detectable amb els detectors de Makrofol correspon a 11 Bq m⁻³ i per una de 4 mesos a 8 Bq m⁻³.

3.5. Calibratge dels detectors de radó.

Disposar d'un sistema de mesura ben calibrat és un requisit indispensable per obtenir mesures de qualitat, ja que amb el pas del temps es van introduint petites modificacions (sensibilitat del detector, variacions en el procés de mesura, lectura o anàlisi, etc.) que podrien fer variar de forma significativa la resposta del sistema. Des que el GFR va començar a treballar amb detectors actius i passius de radó sempre ha anat realitzant re-calibratges dels seus detectors així com també ha participat en diferents intercomparacions nacionals i internacionals. A continuació es descriuen els últims calibratges dels dos tipus de detectors que ha utilitzat el GFR per dur a terme les mesures de la concentració de radó a l'interior de recintes tancats.

3.5.1. Detector actiu.

El detector de centelleig PRASSI va ser calibrat per última vegada el setembre del 2002 en els laboratoris de Silena International S.P.A, Milà, i el valor de l'eficiència de recompte per mesures en continu que ens van proporcionar fou de 22,46 cpm/Bq. Posteriorment ha participat a la primera intercomparació de sistemes de mesura en continu de la concentració de radó a l'INTE, veure apartat 3.6.

3.5.2. Detectors passius.

El febrer de 2004 es va comprar un nou lot de detectors de Makrofol de 500 µm en el Servei de Dosimetria de Radó del FzK. Això va crear la necessitat de dur a terme un nou calibratge per

comprovar la sensibilitat del nou material i que el factor de calibratge no hagués canviat amb les últimes modificacions de les condicions de revelatge.

Metodologia.

Al maig del 2004, es varen enviar 20 dosímetres passius al National Radiological Protection Board (NRPB) de Chilton, Oxfordshire, Regne Unit (que des del 2005 forma part de la Health Protection Agency (HPA)) per ser exposats a la seva cambra ambiental de radó. Els 20 dosímetres es van separar en 4 grups de 5. Un grup, anomenat de trànsit, va servir per controlar l'exposició rebuda durant el transport dels dosímetres i els altres tres grups van ser sotmesos a tres valors diferents d'exposició. Posteriorment, es van sotmetre a les condicions de revelat descrites a l'apartat 2.5.2, es van analitzar amb els sistemes semiautomàtic de lectura i anàlisi de d'imatges descrits a l'apartat 2.6 i es van obtenir tres valors mitjos de densitats de traces. Això va permetre tenir una recta de calibratge, el pendent de la qual proporcionava el factor de calibratge ε . Aquest factor obtingut no va ser definitiu sinó que amb el transcurs de la campanya s'ha anat verificant i corregint.

Resultats.

El valor mig de la densitat de traces dels 5 detectors de trànsit obtingut va ser: $\bar{\rho}_t = (16 \pm 6) \text{ tr cm}^{-2}$. Com que en aquest cas la densitat de traces de trànsit era significativament superior a la del fons dels detectors, es van calcular les densitats de traces netes restant el valor mig de la densitat de traces de trànsit. A la **Taula 3.4** apareixen els valors de les exposicions i les densitats de traces netes obtingudes. Les incerteses relatives sobre els valors de les exposicions, segons l'NRPB, són del 5 % i les incerteses de les densitats de traces es van calcular a partir de l'expressió (3.17) però substituint $\delta\bar{\rho}_0$ per $\delta\bar{\rho}_t$.

Taula 3.4. Valors de l'exposició i la densitat de traces corresponents al calibratge al NRPB dels dosímetres de Makrofol.

$\chi_{Rn} \text{ (kBq m}^{-3} \text{ h)}$	$\bar{\rho}_n \text{ (tr cm}^{-2}\text{)}$
98 ± 5	82 ± 13
440 ± 22	291 ± 14
803 ± 40	557 ± 46

Per calcular la resposta dels dosímetres es va suposar una relació lineal entre les exposicions a radó χ_{Rn} i les densitats de traces netes $\bar{\rho}_n$. Aleshores el coeficient de sensibilitat o de calibratge, ε , es va calcular mitjançant l'expressió (3.19). Utilitzant el programa Origin 7⁶ es va obtenir la recta de regressió de la **Figura 3.9**, amb un coeficient de correlació de $R = 0.99832$. El valor del factor de calibratge obtingut fou:

$$\varepsilon = (0.68 \pm 0.03) \text{ tr cm}^{-2} \text{ (kBq m}^{-3} \text{ h)}^{-1}$$

⁶ OriginLab Corporation, One Roundhouse Plaza, Northampton, MA 01060, EE UU. <http://www.OriginLab.com>.

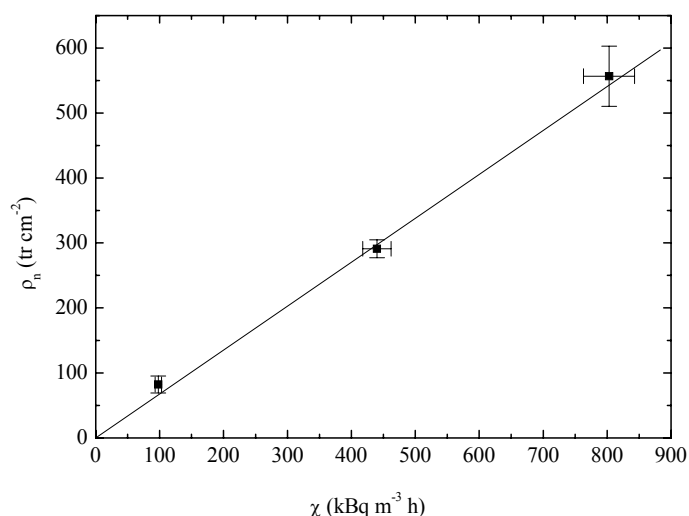


Figura 3.9. Corba de calibratge dels dosimetres de Makrofol.

Aquest valor és lleugerament inferior al que havia utilitzat el GFR fins aleshores de $(0.76 \pm 0.02) \text{ tr cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$, (Amgarou, 2002) i això pot ser degut tant al fet d'haver adquirit nous lots de Makrofol així com al canvi del valor de la intensitat del camp elèctric aplicada en el revelatge dels detectors.

3.6. Intercomparacions dels detectors de radó.

Per tal de comprovar els factors de calibratge obtinguts pels dos tipus de detectors es va participar en dues intercomparacions internacionals i dues de nacionals.

3.6.1. Detector actiu.

Metodologia.

Entre els mesos de novembre i desembre de 2004 es va participar a la Intercomparació de sistemes de mesura en continu de la concentració de radó de l'INTE. El monitor PRASSI va estar exposat a diferents concentracions de radó, fins a 9 kBq m^{-3} , amb l'objectiu d'estudiar la seva resposta per diferents temperatures i humitats, entre 10-30 °C i 30-80 %, respectivament. També va estar exposat a la cambra de toró per avaluar la seva resposta a una concentració de toró de $1,96 \pm 0,39 \text{ kBq m}^{-3}$ (Vargas et al., 2005a).

Resultats.

Els resultats de la Intercomparació de sistemes de mesura en continu de la concentració de radó de l'INTE van posar de manifest que la mesura del PRASSI no es veia afectada per les

condicions de temperatura i humitat però que calia fer una petita correcció en les concentracions de radó mesurades pel detector aplicant un factor de 0.87 ± 0.01 . A la **Taula B.1** de l'Annex B apareixen els resultats de tots els equips que van participar a la intercomparació.

Per altra banda es va observar una clara influència de les concentracions de toró sobre les mesures de radó, ja que quan es va exposar el detector a la cambra de toró va mesurar una concentració mig de radó de $(836 \pm 87) \text{ Bq m}^{-3}$, el que significa més d'un 40 % de la concentració de toró present a la cambra. Aquesta resposta no és estranya ja que aquest detector no discrimina el radó del toró, ja que no té la capacitat de fer espectrometria. Ambdós gasos poden entrar a la seva cel·la de Lucas i aquesta en detecta totes les partícules alfa.

3.6.2. Detectors passius.

Metodologia.

El 2004 i el 2005 es va participar a la Intercomparació de detectors passius de radó que organitza anualment l'antic National Radiological Protection Board (NRPB) i actual Health Protection Agency⁷ de Chilton, Regne Unit. En els dos casos es van enviar 40 dosímetres passius, 10 dels quals no van ser exposats al radó per tal de controlar l'exposició rebuda durant el transport (trànsit) i els altres 30, dividits en tres grups de 10, es van sotmetre a tres valors diferents d'exposició.

El 2005 també es va participar a la intercomparació de sistemes de mesura integradors de la concentració de radó de l'INTE. Es van preparar 20 dosímetres passius dobles, 2 dels quals van servir de trànsit i els altres 18 es van exposar a diferents concentracions de radó, que oscil·laven entre 8 i 9 kBq m⁻³, variant les condicions de temperatura i humitat. Cada dosímetre doble estava format per la unió de dos dosímetres simples diferenciats pel tipus de filtre (a l'apartat 3.7 es descriu la motivació per aquesta comparació). Un tenia un filtre de fibra de fibra i l'altre un filtre de polietilè. L'objectiu d'aquest experiment era comprovar la influència del tipus de filtre comparant les respostes dels detectors sotmesos a les mateixes condicions ambientals de les exposicions.

Resultats de les intercomparacions al NRPB.

A la primera intercomparació de l'NRPB no es va poder comprovar el nou factor de calibratge degut a un problema en el revelat dels detectors, provocat per la utilització d'una dissolució de KOH defectuosa.

Amb els resultats de la segona intercomparació de l'NRPB ja es va poder comprovar el valor del factor de calibratge però es va veure que tenia un límit d'aplicació. A la **Taula B.2** de l'Annex B apareixen els resultats proporcionats per l'NRPB, on s'observa que els de les exposicions 1 i 3 coincideixen, a diferència dels de l'exposició 2. A la **Taula 3.5** es mostren els valors de les exposicions reals i les densitat de traces obtingudes pels detectors de trànsit i pels detectors exposats.

⁷ <http://www.hpa.org.uk>

Taula 3.5. Valors de l'exposició i la densitat de traces corresponents a la intercomparació del 2005 a l'NRPB dels dosímetres de Makrofol.

	χ_{Rn} (kBq m ⁻³ h)	$\bar{\rho}_n$ (tr cm ⁻²)
Trànsit		6 ± 4
Exposició 1	150 ± 8	120 ± 15
Exposició 3	278 ± 14	209 ± 25
Exposició 2	1745 ± 87	959 ± 32

A la **Figura 3.10** estan representades gràficament, mitjançant el programa Origin 7, les densitats de traces en funció de totes les exposicions disponibles fins al moment (calibratge i intercomparació al NRPB). Els detectors exposats a 1745 kBq m⁻³ h presentaven superposició de traces i, tal i com es pot observar a la gràfica, la seva resposta ja no és lineal, per tant, no s'han tingut en compte a l'hora de determinar la recta de regressió. Amb un coeficient de correlació $R = 0.99754$, el valor obtingut pel pendent de la recta és:

$$\varepsilon = (0.69 \pm 0.03) \text{ tr cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$$

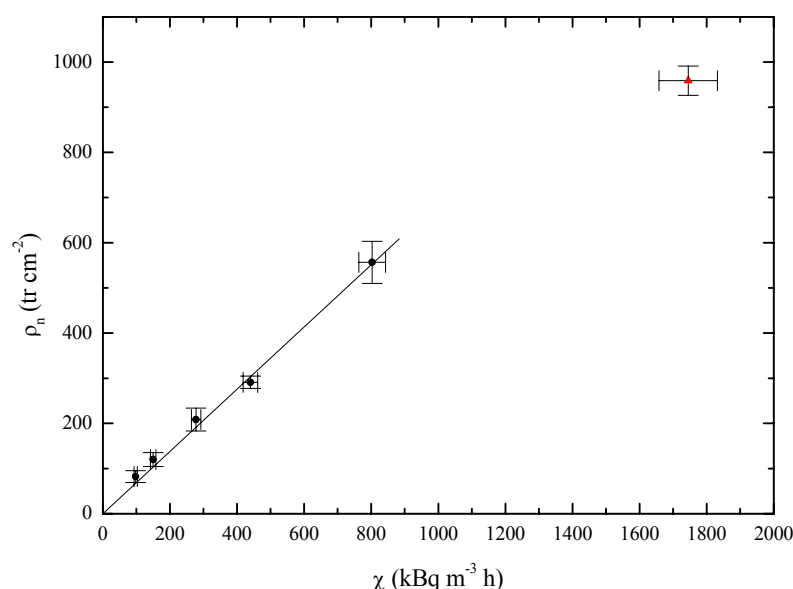


Figura 3.10. Corba de calibratge dels dosímetres de Makrofol a partir de totes les dades del calibratge i dues de la intercomparació a l'NRPB.

Aquest valor confirma el factor ε obtingut inicialment en el calibratge. Amb aquesta gràfica observem que la resposta del detector és aproximadament lineal fins a exposicions de 800 kBq m⁻³ h, el què correspon a una densitat de traces de 560 tr cm⁻².

Al llarg de la campanya de mesura s'han obtingut densitats de traces superiors a aquest valor i aleshores no s'ha pogut aplicar aquest factor de calibratge. Per resoldre aquesta limitació en els casos amb densitats de traces elevades s'ha ajustat tots els resultats a una corba de saturació del tipus:

$$\rho = a(1 - e^{-b \cdot \chi_{Rn}}) \quad (3.28)$$

Per determinar els paràmetres a i b , s'ha desenvolupat l'expressió en una sèrie de Taylor. En primera aproximació, és a dir, per exposicions petites, el primer terme del desenvolupament correspon a l'expressió de la recta $\rho = ab\chi_{Rn}$ i aleshores el producte dels paràmetres a i b coincideix amb el factor de calibratge ε . Per tant, substituint $a = \frac{\varepsilon}{b}$ a l'expressió (3.28), tenim l'expressió:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{b} (1 - e^{-b \cdot \chi_{Rn}}) \quad (3.29)$$

La corba que s'ajusta millor als punts està representada a la **Figura 3.11**. Per calcular l'ajust s'ha utilitzat el programa Origin 7 i la funció BoxLucas.

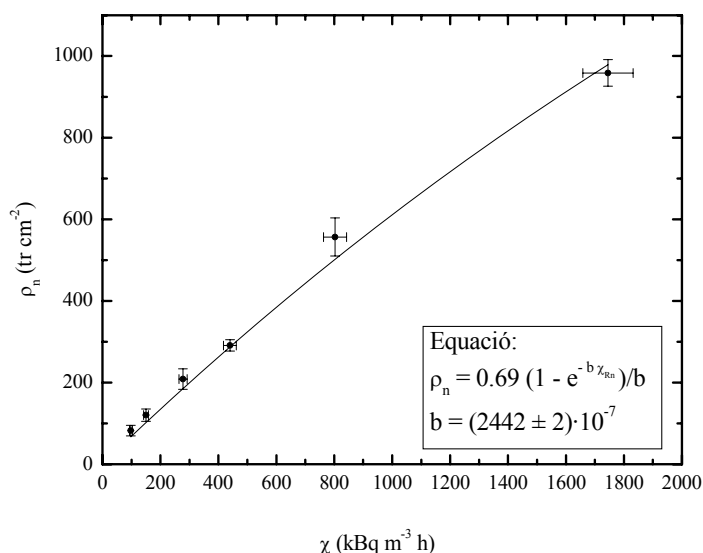


Figura 3.11. Corba de calibratge dels dosímetres de Makrofol a partir de totes les dades del calibratge i la intercomparació a l'NRPB.

El valor obtingut pel paràmetre b és: $b = (2442 \pm 2) \cdot 10^{-7} \text{ (kBq m}^{-3} \text{ h)}^{-1}$. La incertesa del paràmetre b és molt petita comparada amb el seu valor, per tant, en els càlculs de la incertesa de l'exposició s'ha menyspreat la incertesa d'aquest paràmetre.

Aleshores, quan la densitat de traces obtinguda és superior a 560 tr cm^{-2} , el valor de l'exposició s'obté a partir de l'expressió:

$$\chi_{Rn} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{\rho \cdot b}{\varepsilon} \right) \quad (3.30)$$

Resultats de la intercomparació a l'INTE.

Amb la intercomparació de sistemes de mesura integradors de la concentració de radó a l'INTE es va comprovar el factor de calibratge dels dosímetres de Makrofol amb filtre de fibra de vidre i la seva resposta en diferents condicions ambientals. A la **Taula B.3** de l'Annex B es mostren, per cadascuna de les condicions ambientals, els factors de correcció que caldria a aplicar als factors de calibratge dels detectors dels 13 laboratoris que van participar a la intercomparació (el GFR apareix amb el codi 4). La preparació de dosímetres dobles va permetre fer la comparació de dos tipus de filtre (fibra de vidre i polietilè) en diferents condicions ambientals. A la **Taula 3.6** apareixen els factors de correcció pels quals s'hauria de multiplicar la concentració de radó mesurada amb els nostres dosímetres per cadascuna de les condicions ambientals de temperatura i humitat relativa. A partir dels factors de correcció s'han calculat els factors de calibratge que caldria aplicar en cadascuna d'aquestes condicions.

Taula 3.6. Valors de la temperatura, la humitat relativa, el factor de correcció i el factor de calibratge per les diferents exposicions de la intercomparació de dosímetres passius a l'INTE, diferenciant entre tipus de filtre.

Codi de l'exposició	Temperatura (°C)	HR (%)	Filtre fibra de vidre		Filtre de polietilè	
			Factor de correcció	Factor de calibratge (tr cm ⁻² /kBq m ⁻³ h)	Factor de correcció	Factor de calibratge (tr cm ⁻² /kBq m ⁻³ h)
3	10	45	1.04	0.65	1.08	0.62
2	20	30	1.02	0.66	1.21	0.56
1	20	45	1.12	0.60	1.07	0.63
5	20	80	1.09	0.62	1.02	0.66
4	30	45	1.19	0.57	1.21	0.56
6	30	80	1.23	0.55	1.19	0.57

Sota aquestes variacions de temperatura i humitat relativa, la resposta del dosímetre amb aquests dos tipus de filtre és satisfactòria perquè les variacions del factor de calibratge són petites. Es comprova que els rangs de valors dels factors de calibratge corregits pel dosímetres amb filtre de fibra de vidre i amb filtre de polietilè són molt semblants: [0.55-0.66] i [0.56-0.66] tr cm⁻²/kBq m⁻³ h, respectivament. Les condicions ambientals per les quals el valor del factor de calibratge pels dosímetres amb filtre de fibra de vidre és més semblant al valor de (0.69 ± 0.03) (tr cm⁻²)/(kBq m⁻³ h) són les corresponents a l'exposició amb el codi 2, veure la **Taula 3.6**. No coneixem les condicions ambientals exactes en que s'havia dut a terme el calibratge i la intercomparació dels dosímetres a la cambra de radó del NRPB però és de suposar que la temperatura i la humitat no devien estar gaire apartades dels 20°C i el 30%, respectivament.

3.7. Comparació entre filtres i mesures amb diferents humitats.

Paral·lelament a la campanya de mesura que es descriu en aquest treball es van dur a terme les mesures de la concentració de radó a diferents llocs de treball subterranis de Catalunya, com coves, mines, túnels i aparcaments, on la humitat acostuma a ser més alta. El tipus de dosímetre utilitzat en

tots aquests recintes sempre ha estat el mateix però en ambients on la humitat és molt elevada s'ha observat que el filtre de fibra vidre del dosímetre absorbeix aigua de l'ambient fins a quedar saturat. Es va voler comprovar si la resposta del dosímetre variava molt en funció de la humitat i si hi havia algun altre tipus de filtre capaç de substituir els de fibra de vidre en ambients molt humits.

Metodologia.

En primer lloc es va fer una comprovació de la resposta del dosímetre amb diferents tipus de filtre en condicions de baixa humitat. Aquesta primera part de l'estudi va tenir lloc completament als laboratoris del GFR. Després es va fer la comparació per diferents nivells d'humitat, el què va requerir la utilització de la cambra de radó de l'INTE.

Primera part: Comparació tipus de filtre.

Es va preparar un total de 40 dosímetres, separats en 5 grups de 8 dosímetres cadascun. Cada grup es caracteritzava per tenir una de les 5 configuracions de filtre que apareixen a la **Taula 3.4**.

Taula 3.4. Diferents configuracions de filtres utilitzades amb els dosímetres de Makrofol per comparar la resposta del detector a una atmosfera pura de radó.

Codi	Configuració
1	Filtre de fibra de vidre.
2	Filtre de polietilè.
3	Filtre de fibra de vidre + Filtre de polietilè
4	Filtre de fibra de vidre + bossa externa de polietilè.
5	Bossa externa de polietilè (sense filtre de fibra de vidre).

Tots els dosímetres es van exposar a una concentració de radó a l'interior d'una petita cambra⁸ durant 5 dies. Per fer aquest experiment no ens interessava conèixer el valor exacte de la concentració sinó només sotmetre els 40 dosímetres a les mateixes condicions d'exposició, revelat i lectura i comparar les densitats de traces obtingudes per aquestes 5 configuracions de filtres.

Segona part: Exposicions a diferents humitats.

Per continuar l'estudi es va escollir la configuració de filtre que hagués donat una densitat de traces més semblant al dosímetre amb filtre de fibra de vidre. Mitjançant la participació a la intercomparació de sistema de mesura integradors de la concentració de radó de l'INTE, veure l'apartat 3.6.2, es va poder sotmetre un conjunt de dosímetres a diferents condicions de temperatura i humitat. Aquestes exposicions van tenir lloc en atmosferes pures de radó (²²²Rn), per les quals es podia comparar la sensibilitat del detector amb filtre de polietilè amb la del detector amb filtre de fibra de vidre.

⁸ A l'interior d'aquesta cambra s'hi col·loquen uns pots amb pech-blenda que permeten obtenir diferents concentracions de radó. Aquest sistema d'exposició al radó (cambra + pots de pech-blenda) encara no està calibrat. Mitjançant un circuit tancat d'aire connectat al PRASSI o al Rad7 és possible mesurar la concentració de radó en el seu interior.

Resultats.

Primera part: Comparació tipus de filtre.

A la **Taula 3.7** apareix el valor mig de la densitat de traces i la seva desviació estàndard per cadascuna de les diferents configuracions de filtre.

Taula 3.7. Valor mig de la densitat de traces i la seva desviació estàndard per diferents configuracions de filtres.

Codi filtre	1	2	3	4	5
$\bar{\rho}$ (tr cm ⁻²)	324	321	306	270	279
$\sigma_{\bar{\rho}}$ (tr cm ⁻²)	6	5	6	6	8

Els dosímetres amb filtre de polietilè són els que van donat una densitat de traces mig més semblant a la dels dosímetres amb filtre de fibra de vidre.

Segona part: Exposicions a diferents humitats.

A la **Taula 3.6** apareix el valor del factor de calibratge calculat a partir del factor de correcció proporcionat per cadascuna de les exposicions a la intercomparació de l'INTE. A les **Figures 3.12** i **3.13** estan representats els valors del factor de calibratge pels dos tipus de filtre en funció de la humitat i la temperatura, respectivament. Com que el factor de correcció proporcionat no anava acompanyat de cap incertesa no hem pogut representar els factor de calibratge amb barres d'incertesa. Els valors tenen una dispersió semblant pels dos tipus de filtre. No s'observa cap tendència clara a augmentar o disminuir el factor de calibratge en diferents condicions d'humitat. En canvi, pel què respecta a la temperatura s'observa que, quan aquesta augmenta, el factor de calibratge tendeix a disminuir de la mateixa manera pels dos tipus de filtre.

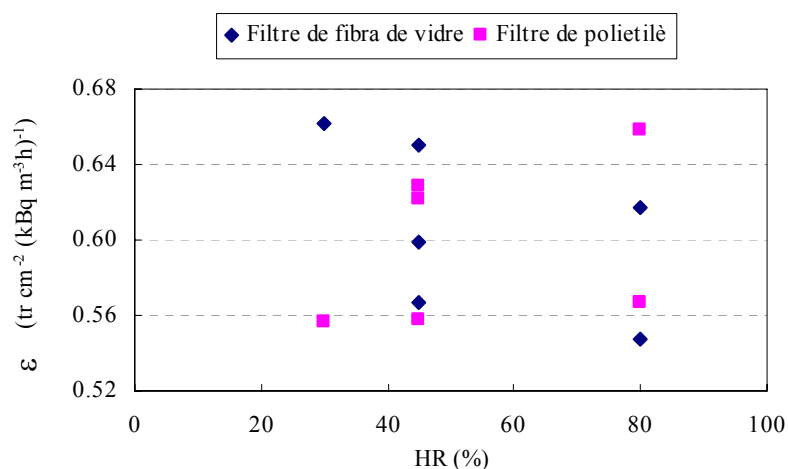


Figura 3.12. Valors del factor de calibratge pels dosímetres de Makrofol amb dos tipus de filtre diferents en funció de la humitat.

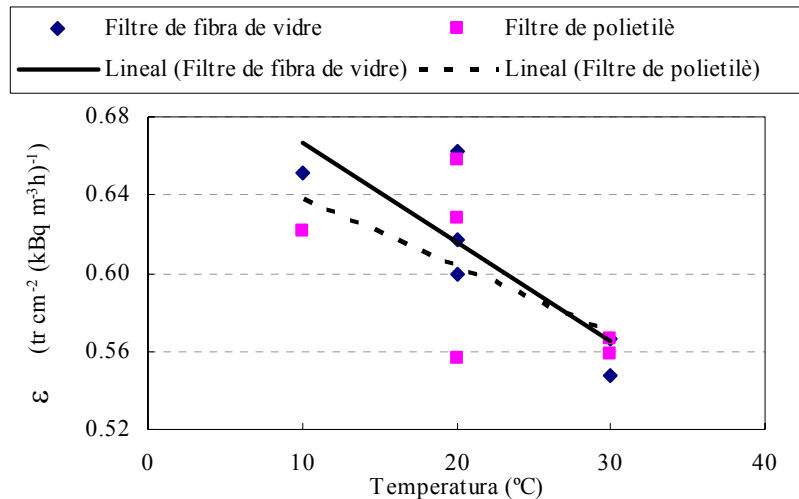


Figura 3.13. Valors del factor de calibratge pels dosímetres de Makrofol amb dos tipus de filtre diferents en funció de la temperatura.

Aquests resultats es informen de que el dosímetre amb filtre de fibra de vidre es pot utilitzar sense problemes amb unes condicions d'humitat entre el 30 i el 80 %. Faria falta disposar d'una estadística més gran i també veure què passa quan la humitat és superior al 80 % per justificar la necessitat d'utilitzar el filtre de polietilè en comptes del filtre de fibra de vidre.

S'han fet estudis per determinar quins són els filtres que millor aturen l'entrada del toró i s'ha trobat que els filtres de plàstic com el polietilè són els més adequats per aquest propòsit. Mentre que el filtre de fibra de vidre permet l'entrada del 100 % del ^{222}Rn i del 81 % del ^{220}Rn al volum sensible de la cambra de difusió, el filtre de polietilè només permet l'entrada del 95 % del ^{222}Rn i del 0.3 % del ^{220}Rn . Per tant, en atmosferes on la presència de toró (^{220}Rn) és significativa, l'ús d'aquests dos tipus de filtres permet distingir aquests dos gasos (Amgarou, 2002).

4. La campanya a la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

4.1. La campanya preliminar d'Olot.

L'any 2002 es va dur a terme una campanya preliminar de la concentració de radó a l'interior de recintes tancats de la ciutat d'Olot (Amgarou et al., 2004¹). En aquell moment no existien antecedents de mesures de nivells de radó a la zona volcànica de La Garrotxa. Es tenia coneixement, però, de que en algunes zones volcàniques d'Itàlia existien nivells de radó elevats a l'interior de recintes tancats (Baixeras et al., 1996d). D'acord amb el reglament de protecció sanitària contra les radiacions ionitzants (Real Decreto 783/2001, 2001), es van realitzar mesures a llocs de treball situats en recintes directament en contacte amb el sòl (soterranis i plantes baixes) on la concentració de radó acostuma a ser més elevada. Per altra banda, per tal d'estudiar el comportament del radó en zones que són o han estat actives recentment, també es van fer mesures a alguns habitatges particulars considerant les característiques geològiques de la zona.

Es va mesurar els nivells de radó de 21 edificis, tant públics com privats, dels quals 18 estaven sobre materials volcànics, 2 sobre sediments lacustres i 1 sobre el substrat terciari. D'aquests edificis 13 eren llocs de treball i 8 eren habitatges. A 4 habitatges es van distribuir detectors per les diferents plantes per comprovar si la concentració de radó disminuïa amb l'alçada. En total es van distribuir 27 detectors passius, que van estar exposats durant el període maig-setembre.

Es va trobar un ample rang de valors de la concentració de radó, [14-717] Bq m⁻³, (Baixeras, et al. 2005) i que els nivells més elevats es trobaven a les plantes més baixes, el què indicava que la font de radó estava en el sòl. També es va trobar que els nivells de radó eren més elevats en els recintes construïts sobre materials volcànics que en els no volcànics i, comparant els resultats entre els diferents tipus de materials volcànics, també es van obtenir valors més elevats en els recintes construïts sobre colades de lava que sobre piroclastos. Això semblava indicar l'existència d'una font de radó important però apartada, ja que el subsòl de la zona d'Olot no és especialment ric en materials granítics (valor mig del contingut en radi: 46 Bq kg⁻¹) (Jönsson 2002). En canvi, sí que presenta unes característiques que permeten al gas radó viatjar grans distàncies (terrenys amb alta permeabilitat com les gredes, i molt fracturats com les colades de lava, que presenten els característics bufadors de la zona). Per explicar la l'existència d'una font de radó important però apartada es va suposar que les falles més pròximes podien ser unes vies de sortida del radó procedent de la desgasificació del mantell terrestre. Aleshores les característiques dels subsòls volcànics facilitarien el transport del gas radó fins als recintes que presentaven nivells de radó més elevats.

¹ Els resultats són lleugerament diferents que els publicats posteriorment a Baixeras et al. (2005) degut a un petit error en la determinació de la concentració de radó.

4.2. Interès geològic de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

L'àrea de treball està dividida en 5 municipis repartits entre dues comarques del nord-est de Catalunya. La ciutat d'Olot i els pobles de La Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles, formen part de la comarca de la Garrotxa, i el municipi d'Amer, està situat al nord de la comarca de La Selva.

4.2.1. El marc geològic.

Aquesta àrea comprèn una bona part de la zona volcànica de la Garrotxa i es troba limitada lateralment per dues falles importants de direcció nord-oest/sud-est: la falla de Banyoles a l'est i la falla d'Amer a l'oest. A la **Figura 4.1** es pot veure la localització de les 5 zones estudiades: Olot al nord i els pobles de la Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols, Les Planes d'Hostoles i Amer que discorren paral·lels a la falla d'Amer.

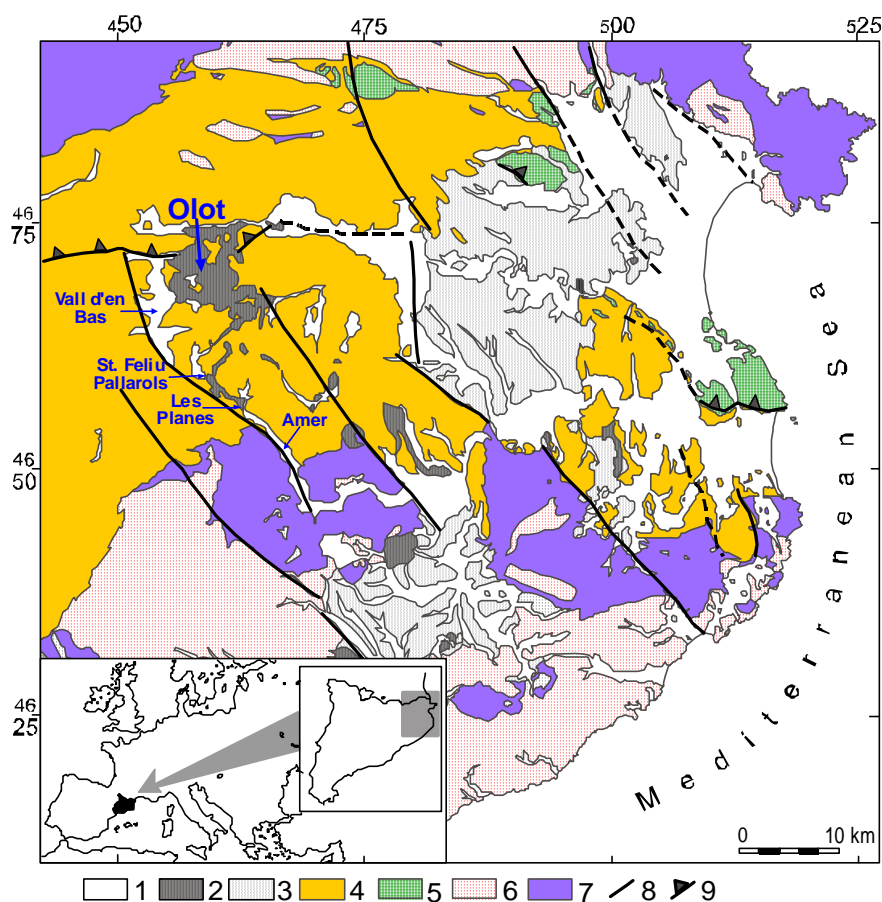


Figura 4.1. Mapa geològic simplificat del nord-est de Catalunya.

- 1: Sediments de Quaternari, 2: Roques volcàniques del Neogen i el Quaternari, 3: Roques sedimentàries del Neogen, 4: Roques sedimentàries del Paleogen, 5: Roques sedimentàries del Mesozoic, 6: Granits del Paleozoic, 7: Roques metasedimentàries del Paleozoic, 8: Falles, 9: Encavalcaments.

El vulcanisme de la comarca de la Garrotxa és recent, entre 350.000 i 10.000 anys (Guerin et al., 1986) i no és casual, sinó que va estar condicionat per l'estructura tectònica i la presència de falles actives. En aquesta regió existeixen tres sistemes de falles de diferent direcció i importància que conformen uns blocs estructurals ben definits, alguns enlairats i d'altres enfonsats. La falla d'Amer forma part del sistema de falles normals de direcció NO-SE que durant el Neogen més recent (d'uns 24 Ma=milions d'anys) van enfonsar els blocs orientals i van donar lloc a les Serres Transversals i la fossa de l'Empordà. Té un traçat complex amb varies fractures entroncades i una longitud que supera els 30 km. La inclinació del pla de falla és d'uns 60° i el salt oscil·la entre 1000 i 1400 m (Saula et al., 1996). Presenta dos trams, el situat al nord de direcció NNO-SSE que limita per l'oest la Plana de la Vall d'en Bas i se situa proper a la ciutat d'Olot; i el tram situat al sud de direcció NO-SE que segueix per l'oest la vall del riu Brugent, on se situa la resta de les zones estudiades.

L'estructura geològica de la zona d'Olot es caracteritza per tenir un substrat de roques sedimentàries del Terciari (d'uns 40 Ma), situat sobre un substrat del Paleozoic (d'uns 500 Ma). Per sobre, es situen les formacions volcàniques i els dipòsits sedimentaris del Quaternari (des de 1.8 Ma fins l'actualitat). La majoria dels volcans, més de 30, es troben situats al damunt mateix de les falles més importants. La major part de la ciutat d'Olot es troba sobre materials volcànics i en alguna zona sobre unes capes de sediments quaternaris dipositats posteriorment sobre els materials volcànics. A la plana de La Vall d'en Bas, en canvi, predominen els sediments quaternaris situats directament sobre el substrat terciari. A les zones de Sant Feliu de Pallerols, **Figura 4.2**, i Les Planes d'Hostoles l'estructura és més complexa perquè es tornen a trobar materials volcànics sobre el substrat terciari. Aquests materials són les colades de lava que van baixar pel la vall del Riu Brugent procedents dels volcans de Fontpobra, Can Tià, Puig de Sant Marc i Puig Roig. Com que les emissions de lava es van produir en diferents etapes, els materials volcànics es poden trobar alternats amb diferents capes de sediments al·luvials i col·luvials.



Figura 4.2. Vista panoràmica de Sant Feliu de Pallerols. Original de l'autora (2005).

La falla d'Amer es troba a l'oest de totes les poblacions estudiades excepte en el cas d'Amer, situada sobre mateix de la falla. En aquesta zona, tal i com s'observa a la **Figura 4.3**, es posen en contacte el substrat terciari amb el substrat de roques metamòrfiques del Paleozoic i ja no s'hi troben

materials volcànics. La línia de la falla es troba recoberta pels dipòsits quaternaris de cons de dejecció i col·luvials que es formen a la zona d'escarpament i per les terrasses al·luvials del riu Brugent.

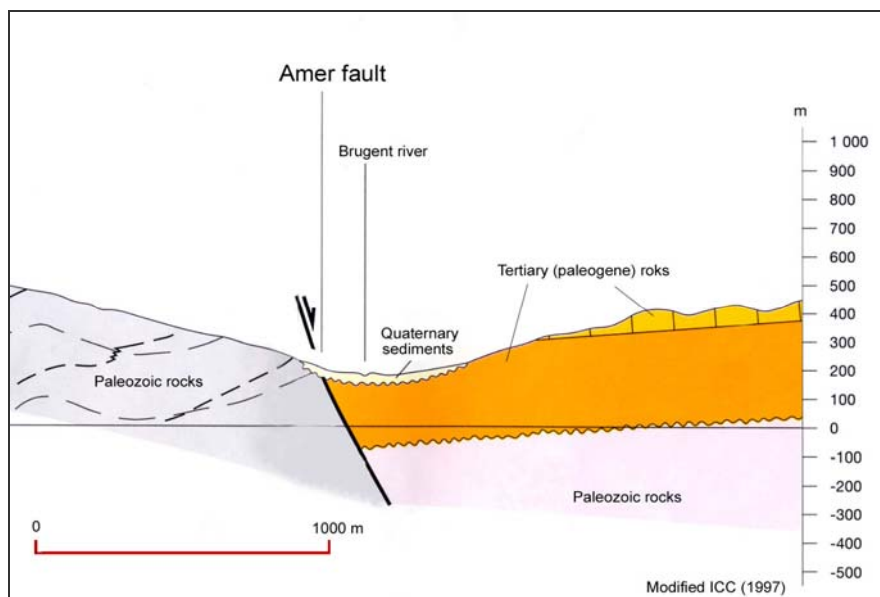


Figura 4.3. Perfil de la falla d'Amer a l'alçada del municipi d'Amer (ICC 1997).

4.2.2. Tipus de materials.

Els diferents materials presents en aquestes zones d'estudi es poden classificar de forma general en materials volcànics o no volcànics.

Materials volcànics: Els volcans de la zona volcànica de La Garrotxa estan constituïts, en general, per dipòsits piroclàstics, formats a partir d'erupcions de tipus estrombolià i hidromagmàtiques (Mallarach, 1998). Les emissions làviques, o colades de lava, solen ocupar el fons de les valls. En alguns llocs, com a la zona d'Olot, van actuar de preses naturals, impeding el drenatge i provocant embassaments.

Materials no volcànics: Les roques sedimentàries del substrat del Terciari estan constituïdes per una certa diversitat de materials com ara conglomerats, gresos o sorrenques, margues, argiles i guixos. Les roques metamòrfiques del substrat del Paleozoic estan constituïdes per l'alternança de gresos i lutites. Les capes gresoses estan constituïdes per quars i feldspats. Durant el Quaternari l'activitat del sistema fluvial va donar lloc a formacions al·luvials i col·luvials en el fons de les valls, que en alguns casos s'han intercalat amb els materials d'origen volcànic. A les zones on les colades de lava van actuar de preses naturals també es va establir una sedimentació de tipus lacustre que va anar omplint aquests embassaments.

Com que la majoria dels recintes estudiats en aquest treball es troben situats sobre materials volcànics o bé sobre dipòsits sedimentaris, a continuació es descriu en més detall les característiques d'aquests materials (Mallarach, 1998).

Els piroclastos.

Els materials piroclàstics són producte de la fragmentació del magma quan és expel·lit fora del cràter. Com que les explosions volcàniques poden arrencar i fragmentar de roca de la xemeneia i del substrat, els piroclastos poden contenir proporcions variables de magma i de les roques encaixants.

Els dipòsits de materials piroclàstics poden tenir característiques molt diverses segons quins siguin els mecanismes de transport i de dipòsit responsables de llur emplaçament. Es poden diferenciar dos conjunts de dipòsits piroclàstics: els de caiguda i els de flux. Tots dos recobreixen la topologia, però els dipòsits piroclàstics de flux tenen tendència a acumular-se a les depressions.

Segons la mida dels fragments, els materials piroclàstics se solen classificar en quatre grups. La pols i cendres fines són els fragments menors de 1/16 mm. Les cendres són els fragments compresos entre 1/16 i 2 mm. Les gredes són aquells que tenen de 2 fins a 64 mm. Per sobre dels 64 mm es tracta de blocs o bombes volcàniques.

Cendres: Formen capes que solen ser primes, de centímetres normalment, i amb el pas del temps s'erosionen o s'alteren amb facilitat. L'alteració de les cendres volcàniques amb els pas dels anys les transforma en unes argiles a simple vista idèntiques a les que provenen de la descomposició o alteració de roques no volcàniques, motiu pel qual costa identificar-les, excepte quan han quedat fossilitzades dins de sediments lacustres o conservades en sòls que van quedar coberts per materials volcànics posteriors.

Gredes: A la regió volcànica predominen les gredes amb diàmetres compresos entre 10 i 30 mm. Les capes de greda dipositades en caiguda lliure solen presentar una estratificació ben marcada, generalment planar. En els pocs cons estrombolians de la regió on predominen les gredes, com ara el Croscat o el Montsacopa (veure la **Figura 4.4**), hi apareixen granoclassificades, bé sigui de forma normal o inversa. La granoclassificació normal, amb els fragments més grans a sota i els més petits a dalt de cada capa, indica que l'impuls eruptiu ha minvat d'intensitat. La granoclassificació inversa indica just el revés.

Bombes volcàniques: Són els fragments piroclàstics de mida més gran que les gredes que han estat expel·lits de manera que adquireixen formes aerodinàmiques, efecte del seu refredament parcial durant la trajectòria aèria.

Escòries volcàniques: Són fragments piroclàstics de dimensions superiors a les gredes, caracteritzats per formes recargolades i tortuoses. Constitueixen la majoria dels cons volcànics estrombolians de la regió i apareixen també formant nivells on s'alternen amb capes de gredes o aïllades. En general, com més lluny són del cràter, més ben classificades estan les escòries volcàniques. Els grans blocs de lava i les bombes hi són rars, i les capes mostren una classificació normal.



Figura 4.4. Vistes parcials d'Olot amb del volcà de Montolivet (figura superior), el volcà de Montsacopa (figura inferior esquerra) i capes de gredes en un flanc del volcà de Montsacopa (figura inferior dreta). Originals de l'autora (2005).

Les colades de lava.

Les emissions fluides que es van escolar per les valls es caracteritzen per una superfície horitzontal sense irregularitats però les formes internes són més complexes. Les clivelles de retracció que es formen durant el refredament de les emissions de lava poden ser verticals o horitzontals. Les primeres donen lloc a columnes prismàtiques mentre que les segones generen unes vistoses lloses lenticulars. Aquestes formes poden aparèixer separades, combinades, intercalades entre elles i/o amb volums de lava massiva. Si la colada basàltica ja s'havia immobilitzat en el decurs del refredament i reposava sobre un terreny planer es formaven probablement columnes prismàtiques. Per contra, quan l'emissió làvica conservava un cert flux laminar durant el refredament, es desenvolupaven formes de retracció lenticular.

Un fenomen curiós associat a les formes interiors de les colades làviques és el dels *bufadors*. Amb el nom de bufadors es designen uns forats, abundosos a les colades basàltiques de Batet, que tenen la particularitat de bufar aire, que sembla fresc a l'estiu i calent a l'hivern. El seu funcionament és menys misteriós del que sembla ja que no són altra cosa que les sortides exteriors de conductes

llargs i estrets dins de les colades o dipòsits piroclàstics, que tenen eixides a diversos nivells topogràfics. Quan es van mesurar les temperatures de l'aire dels bufadors es va comprovar que eren constants al llarg de l'any, uns 12 °C, xifra que coincideix amb la temperatura mitjana anual d'Olot. El contacte amb la roca del subsòl, que es manté a temperatura estable, dona a l'aire que hi circula aquesta temperatura. No és fàcil observar bufadors a Batet avui dia, perquè la majoria es troben a dins de masies construïdes al seu damunt per aprofitar-ne les seves propietats isotèrmiques als rebostos o cellers.

Els dipòsits sedimentaris.

Els materials sedimentaris es poden classificar en dos tipus segons el seu procés de formació: dipòsits al·luvials o col·luvials i dipòsits lacustres.

Dipòsits al·luvials o col·luvials: Aquests dipòsits estan constituïts per fragments de diferents mides, procedents de les formacions del substrat terciari o paleozoic, que han estat transportats per l'acció dels rius i torrenteres cap al fons de les valls. Segons la forma que tenen d'acumular-se es poden distingir tres tipus diferents de dipòsits al·luvials o col·luvials:

Terrasses fluvials típiques: Es formen a les vores dels rius com a conseqüència de les variacions del clima i del nivell del mar que han tingut lloc durant el Quaternari a resultes de les alternances dels períodes glacials i interglacials. Dins la vall del riu Fluvià, a l'est de la zona volcànica es distingeixen quatre nivells de terrasses fluvials.

Terrasses de rebliment: L'obstrucció completa o parcial dels cursos hídrics de la regió volcànica a resultes de la invasió de la llera per colades de lava va produir la formació de llacs de reclosa volcànica. Aquests llacs es varen anar omplint gradualment amb sediments que hi abocaven els rius i torrents, fins quedar reblerts. A la capçalera de la conca hidrogràfica del riu Fluvià, les terrasses de rebliment configuren un seguit de planes tals com la de Bianya, Capsec, la Pinya, les Preses, d'en Bas, del Corb i de Ridaura. A part de les que s'observen en superfície, també s'han identificat terrasses de rebliment en alguns sondatges fets a les rodalies d'Olot, on varen quedar soterrades per emissions de lava i sediments lacustres. A la vall d'en Bas el gruix dels dipòsits quaternaris s'estima superior als 100 m. Estan constituïts per un conjunt de terrasses, l'origen de les quals es deu a les successives obstruccions de la vall del Fluvià causades per l'esguimbament de les laves dels centres eruptius de Batet, del volcà del Puig de la Garrinada, i, finalment, del Puig del Croscat.

Cons de dejecció torrencials: Tots els cons de dejecció de la regió estan vinculats amb les terrasses fluviotorrencials, van actuar en diverses èpoques durant el Quaternari però són inactius en l'actualitat. La reactivació d'aquests cons i els materials associats no sols ha estat condicionada pels canvis climàtics, sinó també pels successius desplaçaments de la falla d'Amer. A la **Figura 4.5** es poden observar un cons de dejecció a l'alçada de Les Planes d'Hostoles.

Dipòsits lacustres: Es poden distingir dos tipus de dipòsits lacustres: els que s'han desenvolupat en llacs de reclosa volcànica i els que ocupen conques de dimensions més reduïdes, com per exemple les formades per cons volcànics. En els dos casos l'acumulació d'aquesta mena de

dipòsits és inferior als 50 m de gruix. Sota el Pla d'Olot existeixen diversos dipòsits sedimentaris d'origen lacustre. Aquests nivells estan constituïts per alternances d'argiles i llims amb nivells torbosos i algunes capes de sorres o materials piroclàstics intercalats. El seu gruix és variable, amb màxims de 25 m. Al nord de la Vall d'en Bas també es troben dipòsits lacustres deguts al barratge ocasionat per l'esguimbament de la colada del Bosc de Tosca, datada en uns 15.000 anys aC. La seva extensió és d'uns 7 km² i la seva fondària màxima 20 m. Està constituït per una alternança de sediments argilosos amb llims, sorres fines i capes de torbes de gruix decimètric.



Figura 4.5. Vista panoràmica de Les planes d'Hostoles al fons de la vall del riu Brugent. Original de l'autora (2005).

4.2.3. Permeabilitats.

Tal i com s'ha comentat anteriorment, la permeabilitat dels materials que configuren el sòl és el factor més important en el procés de transport del radó, ja que determina en major o menor grau la facilitat amb que el radó viatge a través de l'espai intersticial dels materials i, per tant, determina el seu potencial d'entrada i acumulació en els edificis, en cas de que aquesta entrada no es vegi impedita mitjançant unes adequades tècniques de mitigació. Els diferents tipus de permeabilitats que tenen els materials presents a les zones estudiades són els següents:

Materials volcànics: poden presentar unes permeabilitats molt variables. En general, els materials piroclàstics tenen una permeabilitat alta, del tipus intergranular, i les colades de lava, en canvi, són poc permeables. No necessàriament per ser poroses les roques volcàniques han de presentar també una permeabilitat elevada, ja que normalment els seus porus no estan connectats entre ells. Ara bé, la majoria de les roques volcàniques presenten fracturació i aleshores passen a tenir una permeabilitat per fissuració.

Sediments del Quaternari: Els sediments lacustres presenten permeabilitats molt baixes i els al·luvials i col·luvials poden tenir permeabilitats més variables, en funció de les mides dels fragments.

Altres formacions: Les roques sedimentàries que formen el substrat del Terciari i les roques metamòrfiques que formen el substrat del Paleozoic presenten unes permeabilitats molt baixes o nul·les.

4.3. Motivació i objectius de la campanya.

Tot i que actualment el vulcanisme de La Garrotxa no és actiu els geòlegs creuen que encara no està extingit. Al segle XV es van produir una sèrie de terratrèmols destructius amb l'àrea epicentral situada a Amer i el registre sísmic dels terratrèmols de 1909 i 1912 suggereix la possibilitat de que la falla d'Amer encara podria ser activa. (Goula et al., 1990). A més a més, a la comarca de la Selva també existeixen punts amb una certa activitat geotèrmica, com a Caldes de Malavella, la qual cosa és consistent amb la hipòtesis de la degasificació del mantell terrestre, que en aquesta regió es troba a menys de 30 km de profunditat. Per tant, no es pot descartar la possibilitat que d'aquí algun temps es tornin a produir episodis de sismicitat importants o fins i tot d'activitat volcànica en aquesta regió.

Els resultats obtinguts a la campanya preliminar d'Olot van posar de manifest l'interès de seguir estudiant amb més detall la zona volcànica de La Garrotxa, ja que s'havia tractat d'una campanya preliminar i es disposava de poca estadística. Dos anys després es va iniciar una campanya de mesura més gran que permetés, entre altres coses, confirmar els resultats obtinguts i comprovar la possible influència dels materials volcànics en els nivells de radó i la hipòtesis del seu transport.

A continuació s'assenyalen els objectius de la campanya de mesura de la concentració de radó que es va dur a terme a la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

- Comprovar els nivells de radó obtinguts a la campanya preliminar d'Olot.
- Determinar el valor mig anual de la concentració de radó a l'interior d'alguns recintes tancats de les 5 poblacions esmentades i comparar-los amb els nivells d'acció recomanats a la ICRP 65 (1994) i per la CEC (1990).
- Localitzar llocs de treball on els nivells de radó poguessin ser elevats, d'acord amb el reglament de protecció contra les radiacions ionitzants.
- Comprovar la possible influència, observada a la campanya preliminar d'Olot, dels materials volcànics a la concentració de radó dels recintes construïts sobre aquests materials.
- Estudiar la influència d'una falla recentment activa sobre la concentració de radó en el recintes dels 4 municipis més pròxims a ella per tal de confirmar la hipòtesis de la degasificació del mantell terrestre.
- Analitzar les variacions estacionals de la concentració de radó d'alguns recintes estudiats i estudiar les possibles relacions amb les característiques del recinte o amb el tipus de sòl sobre el que estan construïts.
- Estudiar les fluctuacions diàries de la concentració de radó i l'efecte de la ventilació en alguns recintes amb nivells de radó elevats.

Els dos últims objectius es van considerar un cop iniciada la campanya de mesura.

4.4. Disseny de la campanya.

Un cop s'havia seleccionat l'àrea de treball i s'havien establert els objectius de la campanya de mesura es va procedir a fer el seu disseny. Aquesta etapa resultaria molt important ja que els criteris tinguts en compte repercutirien en gran mesura sobre els resultats obtinguts al final de la campanya i determinarien les conclusions que se'n poguessin extreure. A continuació es descriu com es va realitzar la selecció dels recintes tancats, quins van ser els emplaçaments dels dosímetres, com es van distribuir, com es van recuperar i quins van ser els períodes d'exposició.

4.4.1. Selecció dels recintes.

Per tal de facilitar la labor de localització i selecció dels recintes que serien objecte d'estudi es va decidir posar-se en contacte amb els ajuntaments dels municipis d'Olot, de La Vall d'en Vas, de Sant Feliu de Pallerols, de Les Planes d'Hostoles i d'Amer. A través d'una carta informativa i mantenint reunions amb els alcaldes i/o regidors dels diferents municipis, se'ls introduïa en la problemàtica del radó, se'ls explicava l'objectiu de l'estudi i se'ls demanava la seva col·laboració en la localització dels recintes públics i privats on poder instal·lar els dosímetres. En el cas d'Olot es va tornar a sol·licitar la col·laboració a les persones que ja havien participat a la campanya preliminar del 2002. A través de l'ajuntament es va poder triplicar el nombre de recintes estudiats, incrementant sobretot el nombre de llocs de treball públics. A la resta de pobles les mateixes persones vinculades a l'ajuntament sovint s'oferiren com a voluntaris i ens acompanyaven a trobar-ne d'altres. Finalment, també es van trobar alguns col·laboradors pel nostre compte i sobretot gràcies als contactes del Dr. Joan Bach del Departament de Geologia de la UAB.

En total es van seleccionar 125 recintes tancats, distribuïts entre els 5 municipis de la següent forma: 58 a Olot, 19 a La Vall d'en Bas, 17 a Sant Feliu de Pallerols, 14 a Les Planes d'Hostoles i 17 a Amer. A les **Figures 4.6, 4.7, i 4.8** es mostra la distribució de tots els recintes estudiats en aquests municipis. S'han representat els punts de mesura sobre mapes geològics on es distingeixen les unitats geològiques bàsiques, és a dir, els diferents tipus de sòls presents a la zona. Per tal de respectar la confidencialitat de tots els col·laboradors cada recinte té associat un codi numèric. Quan dos recintes estan molt junts i els símbols en el mapa es solapen els codis corresponents apareixen escrits junts i separats per una barra (exemple: 36/39).

A l'inici de la campanya, es va lliurar un full informatiu sobre l'estudi que es volia realitzar a tots els col·laboradors de recintes privats (llocs de treball i habitatges). En aquest document el GFR es comprometia a mantenir la confidencialitat dels col·laboradors i a informar dels resultats obtinguts. Un cop finalitzada la campanya, per tant, també es va lliurar una carta amb els resultats obtinguts de la concentració mitja anual de radó, juntament amb un petit comentari o recomanació. A l'**Annex C** es poden veure dos models de cartes que es va proporcionar al col·laboradors.

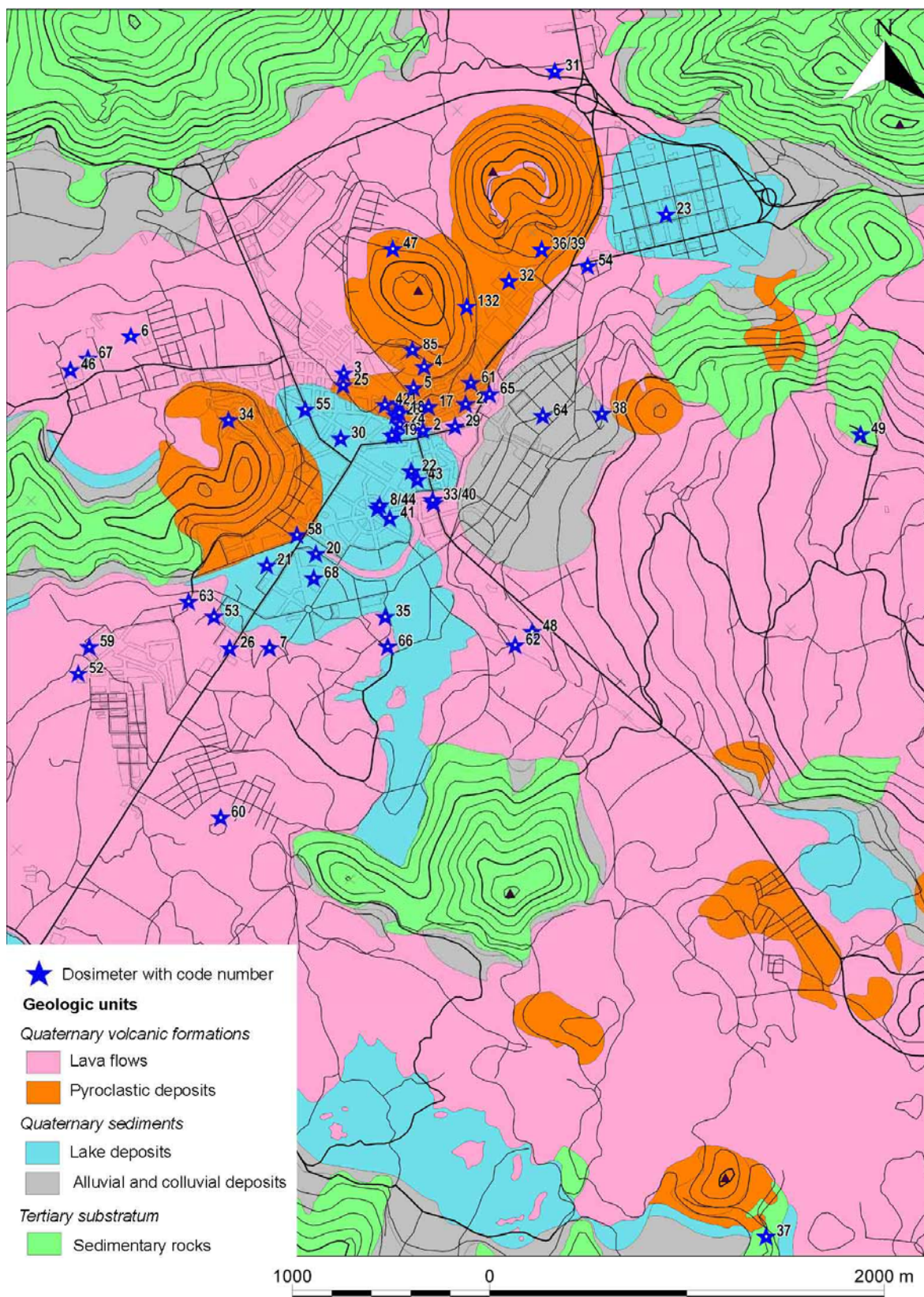


Figura 4.6. Mapa geològic d'Olot on s'observen els tipus de sòls i la distribució dels recintes estudiats.

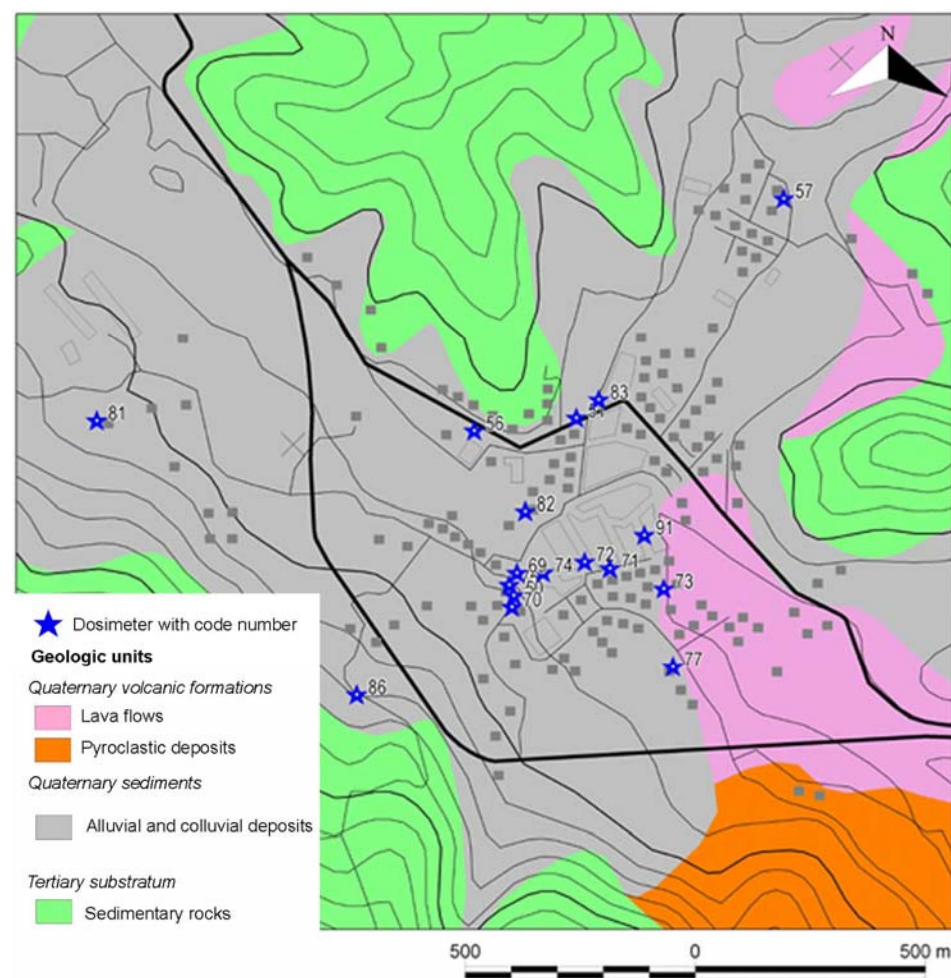
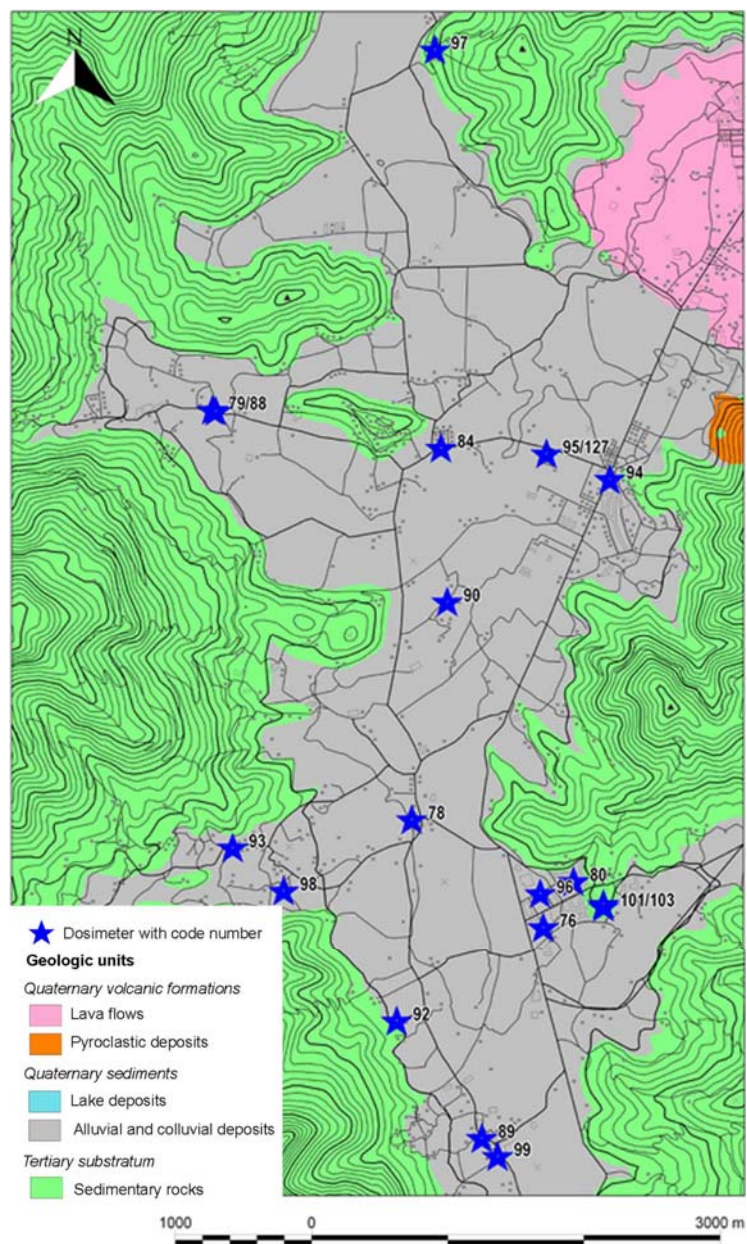


Figura 4.7. Mapes geològics de La vall d'en Bas (esquerra) i de Sant Feliu de Pallerols (dreta) on s'observen els tipus de sòls i les distribucions dels recintes estudiats d'aquestes dues zones.

4.4.2. Distribució dels dosímetres i localització del seu emplaçament.

Tots els dosímetres de Makrofol utilitzats al llarg de la campanya de mesura van estar preparats, distribuïts i recollits pel GFR de la UAB. La preparació dels dosímetres sempre es duia a terme entre un i dos dies abans de la seva distribució i quedaven guardats a la nevera a l'interior de bosses de polietilè on s'havia fet el buit. Tots els dosímetres utilitzats es van preparar en 4 etapes diferents que coincideixen amb els 4 períodes d'exposició que s'esmenten a l'apartat 4.4.3.

A tots els edificis seleccionats només s'hi va instal·lar un dosímetre, excepte a tres d'Olot que, per les seves característiques, era especialment interessant deixar-ne més d'un. En el moment de la instal·lació es va tenir molt en compte els emplaçaments dels dosímetres, procurant que fossin:

- Recintes amb el màxim de contacte amb el sòl (plantes baixes i soterranis). Dels 27 recintes estudiats a la campanya preliminar d'Olot només se'n van seleccionar 21, perquè els altres 6 estaven situats en pisos superiors a la planta baixa.
- Llocs on les persones hi passessin un temps significatiu (excepte en alguns habitatges que tenien alguna característica interessant des del punt de vista de la Geofísica).
- Punts que no destorbessin als habitants, treballadors o usuaris i que no estiguessin gaire a l'abast.
- Punts apartats de les parets i el sostre més de 30 cm, per tal de garantir que no es detectés el toró.
- Punts apartats de fonts de calor, humitat i sistemes de ventilació.

Els punts més freqüents on es deixava instal·lat el dosímetre era sobre algun moble, prestatgeria o penjat del sostre amb fil de nylon. Es va demanar als col·laboradors que procuressin no tocar ni obrir el dosímetre per evitar alteracions en els resultats. Per cada dosímetre es va realitzar una fotografia en el seu emplaçament i una altra de la façana de l'edifici estudiat per tal de facilitar la seva localització i seguiment al llarg de tota la campanya. A la **Figura 4.9** es poden veure algunes fotografies realitzades durant la distribució dels dosímetres per tal de controlar el seu emplaçament. A la **Figura 4.10** s'observen les fotografies de 4 edificis públics on es va distribuir dosímetres.



Figura 4.9. Exemples típics d'emplaçaments dels dosímetres a l'interior de recintes de les zones estudiades.



Figura 4.10. Façanes de quatre edificis públics on es va distribuir dosímetres (Ajuntament d'Olot, imatge superior esquerra, Mas de Can Jordà, imatge superior dreta, Museu dels volcans d'Olot, imatge inferior esquerra, i Ajuntament de Les Planes d'Hostoles, imatge inferior dreta).

A part de la direcció del recinte i els contactes dels col·laboradors, també es va recollir tota la informació que pogués ésser d'interès per a la interpretació dels resultats. A la **Taula D.1** de l'Annex D es mostren les característiques dels recintes estudiats ordenats pel seu codi numèric. El tipus de recinte ens diu si es tracta d'un lloc de treball o un habitatge i el tipus de propietat si és un lloc públic o privat, en funció de si és un recinte que depèn de l'ajuntament o no. La columna de l'emplaçament fa una breu descripció de l'ús del recinte. La última columna de la taula correspon a la distància de cada recinte respecte de la falla d'Amer. Aquesta informació es fa servir per estudiar la influència de la falla sobre els nivells de radó en els recintes dels 4 pobles més pròxims a la falla. Les altres columnes proporcionen informació d'algunes característiques estructurals del recinte (nivell, mida, materials i any de construcció, obertures i ventilació) i les diferents categories dins de cada característica són les següents:

Nivell	Soterrani, semi-soterrani, planta baixa o primera planta.	
Mida:	Petit:	recinte que fa menys de 45 m ³ ,
	Mitjà:	entre 45 i 90 m ³ ,
	Gran:	recinte que fa més de 90 m ³ .
Obertures:	P = portes	
	F = finestres.	

Davant de cadascuna d'aquestes lletres apareix la xifra que indica el número d'obertures d'aquest tipus existent en el recinte.

Ventilació:	Molt baixa:	les portes i finestres s'obren menys de mitja hora al dia,
	Baixa:	entre mitja i una hora al dia,
	Normal:	entre 1 i 3 hores,
	Alta:	entre 3 i 6 hores
	Molt alta:	més de 6 hores al dia.

Aquesta classificació es va realitzar en base a les observacions realitzades durant els diferents canvis dels detectors i per les explicacions sobre l'estat de les diferents obertures del recinte (portes i finestres) al llarg del dia per part de les persones que hi passen més hores. Evidentment es tracta d'una estimació ja que aquest temps pot variar bastant entre estiu i hivern.

Materials de construcció:

Aquesta informació permet controlar si algun recinte té materials que puguin ser rics en radi, com ara pedres granítics, rajoles ceràmiques, etc. que suposin una font important de radó i que puguin contribuir de forma significativa a la seva acumulació. Els codis que apareixen a la taula es corresponen amb la següent classificació de materials i el primer codi és el principal material de construcció:

1. totxo vermell
2. totxana gris
3. pedra sedimentària
4. pedra volcànica
5. ciment
6. formigó
7. calç
8. ceràmica
9. guix
10. pintura
11. fòrmica
12. vidre
13. fusta
14. materials plàstics
15. metalls

Any de construcció:

S'informa de l'any o l'interval d'anys en que es va construir el recinte. Per algunes cases molt antigues no es coneix amb precisió la data de la seva construcció, per això alguns intervals d'anys són molt grans i poden ocupar tot un segle.

4.4.3. Períodes d'exposició i criteri de recollida dels dosímetres.

Durant els 14 mesos que va durar la campanya es va instal·lar un total de 361 dosímetres entre els 125 recintes estudiats. Per tal d'obtenir un valor mig anual de la concentració de radó els dosímetres es van distribuir en els 4 períodes següents:

- Primer període (Abril – Juliol 2004): Es van distribuir 121 dosímetres i se'n van recuperar 119.
- Segon període (Juliol – Novembre 2004): A dos municipis es va realitzar petites modificacions, introduint i/o deixant algun recinte. Es van distribuir 122 dosímetres i al final del període només es va recollir la meitat, deixant la resta exposats fins al final de la campanya.
- Tercer període (Olot: Novembre 2004 - Febrer 2005; Altres Pobles: Novembre 2004 – Març 2005): Es van distribuir, i posteriorment recollir, els dosímetres d'aquells recintes on s'hi havia recollit el dosímetre del segon període d'exposició.
- Quart període (Olot: Febrer – Maig 2005; Altres pobles: Març – Juny 2005): Es van substituir els dosímetres d'aquells mateixos recintes on s'havia fet el canvi en el tercer període. Al final de la campanya es van recuperar tots els dosímetres.

S'havia establert un criteri per seleccionar els dosímetres que calia recollir a cada període i els que es podien deixar exposats més d'un període. Amb uns períodes d'exposició entre 3 i 4 mesos, mesurar nivells de la concentració de radó inferiors a 55 Bq m^{-3} representava tenir unes densitats de traces $\rho < 100 \text{ tr cm}^{-2}$, el què significava que la incertesa teòrica relativa seria superior al 10%. En canvi, si el temps d'exposició hagués estat d'un any, amb aquest valor de la concentració, s'obtindria una densitat de traces de 327 tr cm^{-2} , corresponent a la zona lineal de la corba de calibratge del detector i molt inferior al valor de 560 tr cm^{-2} a partir del qual ja ajustariem a una corba de saturació. Per altra banda, des del punt de vista de la protecció radiològica, un recinte amb un nivell de radó inferior a 55 Bq m^{-3} no representa cap increment significatiu a la dosi de radiació rebuda per les persones que hi puguin treballar o viure. Per tant, de tots els dosímetres distribuïts al principi del segon període d'exposició, només es recollirien aquells situats en recintes on la concentració de radó mesurada durant el primer període hagués estat igual o superior a 55 Bq m^{-3} . A la resta de recintes, el dosímetre es deixaria exposat fins al final de la campanya (uns 9 o 10 mesos més) i d'aquesta manera es podria obtenir el valor mig anual de la concentració de radó sense perill de que el detector quedés saturat de traces.

Quan es realitzava la recollida dels dosímetres es comprovava l'estat general del dosímetre, per si hagués sofert algun desperfecte i que estigués correctament etiquetat. Es prenia especial atenció en comprovar que el filtre estigués en bones condicions i que no hagués acumulat molta pols o absorbit humitat. En retornar-los al nostre laboratori es procedia al seu desmuntatge i emmagatzematge, és a dir, s'obria els dosímetres per extreure'n els detectors, comprovant que no haguessin sofert cap manipulació i es guardaven al buit i a la nevera. Pocs dies després es procedia al revelatge, lectura i anàlisi dels resultats, seguint la metodologia descrita en el capítol 3.

Dels 361 dosímetres distribuïts durant tota la campanya es van recuperar un total de 358 (99%) i només se'n van perdre 3, el què posa en evidència la bondat del mètode utilitzat per la seva distribució i recollida. A la **taula 4.1** es mostra el nombre de recintes mesurats i el nombre de dosímetres distribuïts, recuperats, romanents i perduts per cada poble i per cada període de mesura. En el primer període de mesura dos detectors van quedar sense recollir (romanents) perquè els recintes estaven tancats. A partir del segon període el nombre de detectors romanents va ser superior, ja que s'havia posat en pràctica el criteri descrit anteriorment.

Taula 4.1. Nombre de recintes mesurats i nombre de dosímetres distribuïts, recuperats, romanents i perduts per cada poble estudiat i per cada període d'exposició de la campanya de mesura.

Període d'exposició	Poble	Nº de recintes mesurats	Nº de dosímetres			
			Distribuïts	Recuperats	Romanents	Perduts
1r	Olot	57	57	56	1	-
	La Vall d'en Bas	18	18	17	1	-
	Sant Feliu de Pallerols	17	17	17	-	-
	Les Planes d'Hostoles	14	14	14	-	-
	Amer	15	15	15	-	-
2n	Olot	58	57	32	25	1
	La Vall d'en Bas	19	18	7	12	-
	Sant Feliu de Pallerols	16	16	9	7	-
	Les Planes d'Hostoles	14	14	7	7	-
	Amer	17	17	6	11	-
3r	Olot	57	32	31	26	-
	La Vall d'en Bas	19	7	6	13	-
	Sant Feliu de Pallerols	16	9	8	8	-
	Les Planes d'Hostoles	14	7	7	7	-
	Amer	17	6	5	12	-
4rt	Olot	57	31	56	-	1
	La Vall d'en Bas	19	6	18	-	1
	Sant Feliu de Pallerols	16	8	16	-	-
	Les Planes d'Hostoles	14	7	14	-	-
	Amer	17	5	17	-	-

5. Resultats de la campanya de mesura.

En els capítols 3 i 4 s'ha descrit la metodologia utilitzada i el disseny de la campanya de mesura que van permetre determinar la concentració de radó dels recintes seleccionats de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer. A continuació es presenten tots els resultats obtinguts, analitzats primer des del punt de vista de l'interès radiològic del radó, juntament amb la presentació de dos casos particulars estudiats amb més detall, i després des del punt de vista de la Geofísica, on s'analitza la influència del tipus de sòl i de la falla d'Amer i on també s'estudien les variacions estacionals de la concentració de radó pel conjunt de recintes que van estar mesurats en 4 períodes consecutius.

5.1. Interès radiològic dels nivells de radó.

Tots els resultats de la concentració de radó corresponents a cada període de mesura i el valor mig anual per cadascun dels recintes apareixen a la **Taula D.2** de l'Annex D. Dels 125 recintes estudiats, un total de 54 va superar el valor de 55 Bq m^{-3} en el primer període de mesura, però finalment, només 53 recintes van ser mesurats en 4 períodes curts (de 3 ò 4 mesos). La resta de recintes van tenir dos períodes de mesura, el primer curt i el segon llarg (de 6 ò 9 mesos).

La mitja aritmètica, $\overline{C_{Rn}}$, i el rang de valors de la concentració mitja anual de radó dels 125 recintes estudiats són $(110 \pm 17) \text{ Bq m}^{-3}$ i $[15 - 1464] \text{ Bq m}^{-3}$, respectivament. Com que els resultats s'ajusten a una distribució lognormal, tal i com es pot observar a la **Figura 5.1**, és més adequat donar la mitjana geomètrica que no pas l'aritmètica.

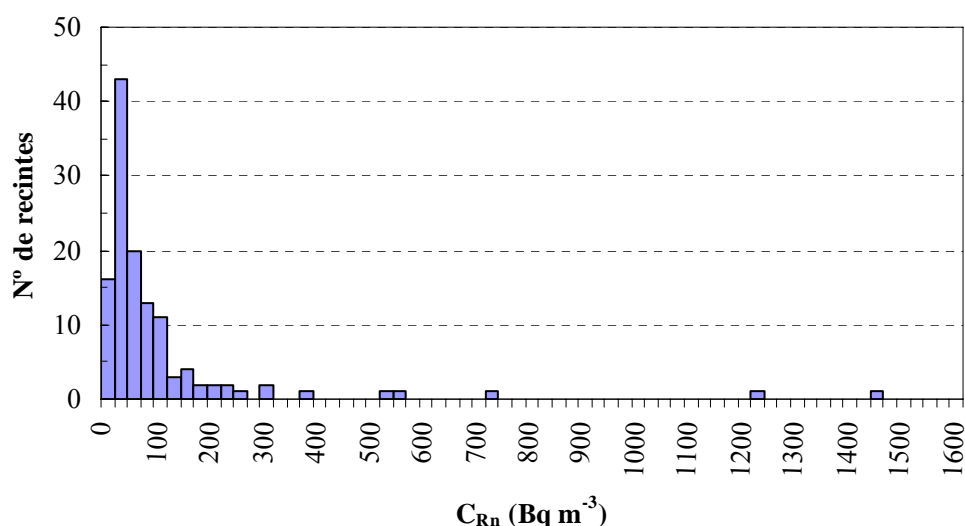


Figura 5.1. Histograma de les concentracions de radó obtingudes en els recintes estudiats durant la campanya de mesura a la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

La mitja geomètrica de les concentracions de radó, $(\overline{C_{Rn}})_g$, dels 125 recintes estudiats és $(63 \pm 2) \text{ Bq m}^{-3}$, obtinguda a partir de les expressions (3.25) i (3.26). Aquest valor és lleugerament més gran que les mitges geomètriques de la concentració de radó obtingudes a Catalunya¹ o Barcelona², però és semblant a l'obtingut en altres zones volcàniques de l'estat, com les Illes Canàries³. S'ha de tenir en compte que la majoria dels recintes estudiats estaven situats en plantes baixes (82 %) i soterranis o semi-soterranis (18 %) i també que l'objectiu de la campanya no era trobar el valor mig de la concentració de radó al qual estava sotmesa tota la població de l'àrea estudiada, ja que d'haver estat així els dosímetres haurien estat distribuïts en funció del cens de la població dels 5 municipis i repartits de forma aleatòria en diferents tipus de recintes, situats a diferents nivells del terra, etc. Aleshores, probablement, la mitja geomètrica obtinguda hauria estat inferior a aquest valor mesurat.

5.1.1. Comparació amb els resultats de la campanya preliminar d'Olot.

A l'última columna de la **Taula D.2** també apareixen els valors de la concentració de radó que es van obtenir a la campanya preliminar d'Olot l'any 2002. Si comparem els resultats d'aquella campanya preliminar amb els valors mitjos anuals obtinguts en aquesta campanya es comprova que, en general, coincideixen. Com que el període de mesura a la campanya preliminar només havia estat de maig-setembre, si es comparen els resultats de la campanya preliminar amb els corresponents als dos primers períodes d'exposició d'aquesta campanya (abril-juliol i juliol-novembre) es comprova que els resultats encara coincideixen més. Els casos on el desacord entre els resultats de les dues campanyes és més significatiu són els recintes amb els codis 40 i 48, dos soterranis amb poca ventilació. Si es comparen els nivells de radó dels períodes d'exposició que serien equivalents, els resultats de les dues campanyes encara són més diferents. Els valors obtinguts en aquesta campanya són aproximadament el doble de grans que els de la campanya preliminar. El fet de que mesures realitzades en les mateixes èpoques però de diferents anys donin resultats tan diferents pot ser degut a l'existència de variacions anuals importants de la concentració de radó, de la mateixa manera que hi ha grans variacions estacionals.

5.1.2. Nivells de radó en llocs de treball i habitatges.

Amb l'objectiu de portar a la pràctica el reglament sobre la protecció sanitària contra les radiacions ionitzants, impulsats pel CSN, dues terceres parts dels recintes estudiats van ser llocs de treball i la resta habitatges particulars. La mitja aritmètica, $\overline{C_{Rn}}$, i la mitja geomètrica, $(\overline{C_{Rn}})_g$ de la

¹ Les mitges geomètriques de la concentració de radó a Catalunya i en el conjunt de l'estat espanyol obtingudes a les campanyes de mesura nacionals són 23 i 41 Bq m^{-3} , respectivament (Martín, 2004). Cal tenir en compte que l'objectiu de les campanyes no era mesurar el valor mig de la concentració de radó a que estava sotmesa el conjunt de la població, sinó localitzar les zones amb els nivells de radó més elevats. Tal i com s'ha comentat a Catalunya només es van realitzar 78 mesures, per tant, els valors obtinguts no són del tot representatius.

² La campanya de mesura de la concentració de radó a Barcelona (Baixeras, et al., 1996b) es va dur a terme amb l'objectiu de mesurar el valor mig al qual estava sotmesa la població i el valor de la mitja geomètrica obtingut (28 Bq m^{-3}) ja es més representatiu.

³ A les illes de Tenerife i Fuerteventura es va obtenir unes mitges geomètriques de 69 i 59 Bq m^{-3} , respectivament (Martín Matarranz, 2004).

concentració anual de radó obtinguda en aquests dos tipus de recintes apareix a la **Taula 5.1**. Es comprova que els llocs de treball estudiats presenten un rang i uns valors mitjos de la concentració de radó més baixos que en el cas dels habitatges estudiats.

Taula 5.1. Valors de les mitges aritmètica i geomètrica i del rang de la concentració de radó dels recintes estudiats agrupats segons si són llocs de treball o habitatges.

Tipus recinte	Nº de recintes	Rang (Bq m ⁻³)	\overline{C}_{Rn} (Bq m ⁻³)	$(\overline{C}_{Rn})_g$ (Bq m ⁻³)
Lloc de treball	94	15 - 742	88 ± 11	60 ± 2
Habitatge	31	18 - 1464	174 ± 61	72 ± 3

Classificant els recintes per pobles obtenim els resultats que apareixen a la **Taula 5.2**. Es comprova que els nivells de radó més elevats es van mesurar a Olot, sobretot en el cas dels habitatges.

Taula 5.2. Valors de les mitges aritmètica i geomètrica i del rang de la concentració de radó dels recintes estudiats agrupats per pobles i segons si són llocs de treball o habitatges.

Poble	Nº recintes	Tipus recinte	Concentració de radó (Bq m ⁻³)			
			Rang	\overline{C}_{Rn}	\overline{C}_{Rn}	$(\overline{C}_{Rn})_g$
Olot	49	Lloc de treball	17 - 742	104 ± 18	157 ± 36	81 ± 3
	9	Habitatge	22 - 1464	(45 ± 18)·10 ¹		
La Vall d'en Bas	15	Lloc de treball	17 - 165	55 ± 12	56 ± 9	44 ± 2
	4	Habitatge	19 - 80	58 ± 14		
Sant Feliu de Pallarols	13	Lloc de treball	15 - 247	67 ± 17	67 ± 13	52 ± 2
	4	Habitatge	41 - 96	64 ± 13		
Les Planes d'Hostoles	6	Lloc de treball	30 - 207	96 ± 28	83 ± 23	58 ± 2
	8	Habitatge	18 - 317	73 ± 35		
Amer	11	Lloc de treball	16 - 309	85 ± 29	71 ± 19	51 ± 2
	6	Habitatge	26 - 66	49 ± 67		

Comparant els resultats obtinguts amb els nivells d'acció recomanats pel la ICRP 65 es comprova que no n'hi ha cap lloc de treball que superi els 1500 Bq m⁻³ i que la majoria té unes concentracions de radó molt inferiors a les del rang 500-1500 Bq m⁻³. Només hi ha un parell de recintes que tenen valors superiors a 500 Bq m⁻³. Es tracta dels llocs de treball 8 i 44, ambdós situats dins el mateix edifici. A l'apartat 5.2 es presenta un estudi més detallat d'un d'aquests dos recintes.

Pel què respecta als habitatges mesurats, la majoria dels nivells de radó estan per sota dels 200 Bq m⁻³, que és el nivell d'acció pels habitatges de nova construcció recomanat per la CEC. A Olot hi ha quatre recintes que superen aquest nivell de radó, tres dels qual superen els 400 Bq m⁻³, que és el nivell d'acció pels habitatges existents, recomanat per la mateixa CEC. En aquests casos concrets, els habitatges són bastant antics i els dosímetres es van col·locar en dependències on els habitants hi passen poc temps però que tenen alguna característica interessant des del punt de vista geofísic (a dos d'aquests recintes hi ha bufadors, veure l'apartat 4.2.2), per tant, els nivells de radó existents no representen un risc radiològic significatiu pels habitants d'aquestes cases. Finalment, en un habitatge de les Planes d'Hostoles el dosímetre va estar instal·lat en una dependència on s'hi passa més temps i va mesurar una concentració de radó supera els 200 Bq m⁻³, però, com que es tracta d'una casa antiga i

no superar els 400 Bq m^{-3} no cal realitzar-hi cap tipus d'actuació especial des del punt de vista de la protecció radiològica. Per tant, com que majoritàriament es van mesurar recintes situats en soterranis i plantes baixes i no es van trobar nivells de radó molt elevats, llevat les excepcions esmentades, es pot concloure que la població d'aquests municipis no està sotmesa a un risc radiològic significatiu.

5.1.3. Influència dels factors estructurals dels recintes.

S'ha agrupat els recintes estudiats en funció del seu nivell respecte el sòl, és a dir, depenent de si són soterranis o semisoterranis, plantes baixes i primeres plantes, i s'ha calculat les mitges aritmètica i geomètrica de les concentracions de radó de cada grup. A la **Taula 5.3** apareixen els resultats obtinguts.

Taula 5.3. El rang de valors, la mitja aritmètica i la mitja geomètrica de la concentració de radó de tots els recintes agrupats segons si són soterranis o semisoterranis, plantes baixes i primeres plantes.

Tipus recinte	Nº de recintes	Rang (Bq m^{-3})	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m^{-3})	$(\overline{C_{Rn}})_g$ (Bq m^{-3})
Soterrani o semi-soterrani	22	18 - 1464	240 ± 82	103 ± 3
Planta baixa	102	15 - 742	82 ± 10	57 ± 2
Primera planta	1	-	26 ± 3	-

Es comprova que la mitja geomètrica del soterranis i semi-soterranis és gairebé el doble que la de les plantes baixes. Això posa en evidència que, en general, la principal font de radó en aquests recintes estudiats és el sòl sobre el que estan construïts.

Per veure si també existeix una influència dels materials de construcció entre els recintes situats en plantes baixes s'ha fet una classificació segons el seu principal material de construcció i s'ha calculat els valors mitjos. A la **Taula 5.4** es presenta la mitja aritmètica, el rang de valors i la mitja geomètrica de la concentració de radó per aquest recintes.

Taula 5.4. El rang de valors, la mitja aritmètica i la mitja geomètrica de la concentració de radó dels recintes situats a plantes baixes i classificats en funció dels seus principals materials de construcció.

Material construcció	Nº de recintes	Rang (Bq m^{-3})	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m^{-3})	$(\overline{C_{Rn}})_g$ (Bq m^{-3})
Pedra	35	16 - 319	89 ± 12	68 ± 2
Totxo	58	15 - 742	85 ± 16	55 ± 2
Ciment/Formigó	7	17 - 82	45 ± 9	39 ± 2
Altres	2	21 - 46	34 ± 13	-

Comparant les mitjanes geomètriques es comprova que, en general, els recintes construïts amb pedra presenten uns nivells de radó lleugerament superiors als recintes construïts amb la resta de materials.

Els recintes d'Olot que tenen la pedra com a principal material de construcció es poden agrupar en funció dels 2 tipus de pedra utilitzada per la construcció dels recintes d'aquesta zona (volcànica o sedimentària). En general, les pedres volcàniques es caracteritzen per ser pobres en radi, mentre que les sedimentàries poden tenir un contingut més elevat d'aquest element. A la **Taula 5.5**

apareixen els resultats de les plantes baixes d'Olot en funció del principal material de construcció. Novament, només es comparen els resultats entre les plantes baixes d'aquesta zona.

Taula 5.5. El rang de valors i la mitja aritmètica de la concentració de radó de les plantes baixes d'Olot en funció del principal material de construcció.

Material	Nº de recintes	Rang (Bq m ⁻³)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)
Pedra sedimentària	7	22 - 260	124 ± 29
Pedra volcànica	5	32 - 126	72 ± 21
Totxo	26	17 - 742	112 ± 33
Ciment/Formigó	2	58 - 82	70 ± 12

Tot i que l'estadística és molt petita i no s'han tingut en compte altres paràmetres com la ventilació del recinte, sembla que els recintes construïts amb pedra sedimentària i totxo presenten els nivells de radó més elevats, en canvi, els recintes amb nivells més baixos estan construïts amb pedra volcànica o blocs de ciment/formigó. Faltaria disposar de mesures del contingut en radi en aquests materials per poder concloure que els materials de construcció també tenen una influència en els nivells de radó dels recintes situats en les plantes baixes o pisos superiors.

5.2. Estudis particulars.

Cal destacar que la concentració de radó obtinguda per cada recinte és el valor mig anual mesurat durant les 24 hores del dia i, per tant, pot ser diferent a la concentració real a què estan exposades les persones. Per exemple, si durant la major part del dia la ventilació d'un recinte és baixa o pràcticament nul·la però, en el moment que hi entren persones, aquesta augmenta perquè s'obren portes i finestres, aleshores la concentració de radó a que estan exposades és inferior al valor mig mesurat pel dosímetre. En canvi, si es produeix el cas oposat en que la ventilació es redueix, aleshores la concentració de radó podria ser superior al valor mig. Per estimar la dosi que reben els usuaris de tots els recintes estudiats lo ideal seria conèixer la variació diària i estacional dels nivells de radó al seu interior així com saber quines hores del dia hi ha gent, etc. Tenir en compte tots aquests paràmetres, cas per cas, s'escapava dels objectius d'aquesta campanya. En canvi, el què es va fer va ser escollir dos recintes i estudiar amb una mica més de detall les fluctuacions diàries de la concentració de radó i l'efecte de la ventilació sobre el seu nivell de radó.

El primer recinte estudiat, amb el codi 42, va ser el lloc de treball que havia presentat un valor de la concentració de radó més elevat a la campanya de mesura preliminar d'Olot, tot i que no representava un risc significatiu. L'altre recinte estudiat, va ser un dels dos llocs de treball que havia presentat nivells de radó superiors als 500 Bq m⁻³ en aquesta segona campanya de mesura, el recinte amb el codi 8. També hauria estat interessant realitzar una mesura en continu en el recinte amb el codi 44, però en tractar-se d'una aula utilitzada diàriament per nens i adolescents, es va descartar la possibilitat de deixar-hi el monitor de radó PRASSI.

5.2.1. El recinte 42.

Aquest recinte s'utilitza com a sala d'exposicions i depèn de l'ajuntament. Està situat en un semi-soterrani que disposa de diverses obertures però les que donen accés a l'exterior de l'edifici acostumen a estar tancades i aleshores la ventilació esdevé baixa. El valor mig anual de la concentració de radó que s'ha obtingut en aquest recinte és de (198 ± 11) Bq m⁻³.

Els primers resultats de la campanya de mesura del 2002 a Olot van indicar per aquest recinte un nivell de radó de (829 ± 75) Bq m⁻³. Aquesta concentració de radó estava dins del rang 500-1500 Bq m⁻³ que recomana la ICRP per a nivells d'acció en llocs de treball i això implicava que, com a mínim, calia realitzar una segona mesura per comprovar el valor obtingut. Posteriorment es va comprovar que el valor correcte de la concentració de radó per aquest recinte era de (266 ± 24) Bq m⁻³, el què canviava totalment la situació del recinte. Quan es va descobrir això ja s'havia proporcionat un informe a l'ajuntament d'Olot amb el primer resultat i els treballadors del recinte ja en tenien coneixement. S'havia acordat dur a terme una comprovació dels nivells de radó mesurats amb els detectors de Makrofol i fer un petit estudi de l'efecte de la ventilació sobre els nivells de radó, amb l'objectiu de proporcionar als treballadors del recinte una recomanació per reduir la seva exposició al radó. Per aquest motiu es va fer la mesura en continu que es detalla a continuació.

Metodologia.

Les mesures en continu de la concentració de radó amb el monitor de radó PRASSI es van dur a terme en dues etapes diferents:

1ª etapa: 10 i 11 de febrer del 2005. La mesura en continu va durar 30 hores. Es va demanar als responsables del local que durant el matí del segon dia obrissin les finestres de la sala durant una hora per veure l'efecte de la ventilació sobre la concentració de radó. Aquesta operació va tenir lloc entre les 11 i les 12 del matí. Simultàniament es van mesurar les condicions ambientals (temperatura, pressió atmosfèrica i humitat relativa) de l'interior de la sala mitjançant una estació meteorològica TFA⁴ i es van comparar amb les mesures per l'estació automàtica del Servei Meteorològic de Catalunya⁵ (SMC) situada a Olot.

2ª etapa: del 6 al 18 de maig del 2005. Es va demanar als responsables del local que intervinguessin en 4 moments puntuals per obrir i tancar una finestra de la sala. Se'ls va proporcionar un full de seguiment, com el que es mostra a la **Figura 5.2**, on s'indicava els passos a seguir i on s'havien d'anotar les hores de les diferents actuacions.

⁴ TFA Dostmann GMBH + Co.KG. Zum Ottersberg 12. 97877 Wertheim-Reicholzheim. Alemanya.

⁵ Informació disponible a: <http://www.meteocat.com>

Full de seguiment:

Divendres 6: es deixen el detector i l'estació meteorològica

Dissabte 7 (tarda): obrir les finestres de la sala i **1 hora** després tancar-les.

Hora inici: 18:30 Hora fi: 19:30

Diumenge 8 i dilluns 9: sense intervenció.

Dimarts 10 (tarda): obrir les finestres de la sala i **1 hora** després tancar-les.

Hora inici: 17:15 Hora fi: 18:29

Dimecres 11(tarda): obrir les finestres de la sala i **1 hora** després tancar-les.

Hora inici: 17:10 Hora fi: 18:10

Dijous 12 i divendres 13: sense intervenció.

Dissabte 14 (tarda): obrir les finestres de la sala i **2 hores** després tancar-les.

Hora inici: 18:45 Hora fi: 20:45

Dimecres 18: es recullen el detector i l'estació meteorològica.

Figura 5.2. Full de seguiment entregat als col·laboradors del recinte 42 per la segona etapa de mesures en continu. En ell s'indiquen les diferents intervencions en la ventilació del recinte i els col·laboradors van anotar les hores d'aquestes intervencions.

Resultats de la 1^a etapa.

Els nivells de radó mesurats amb el PRASSI durant les 30 hores que va durar la mesura apareixen a la **Figura 5.3**. El valor mig de la concentració de radó mesurat durant les 24 hores prèvies a la ventilació va ser de 283 Bq m^{-3} , amb un rang de valors de $[191\text{-}346] \text{ Bq m}^{-3}$. Comparant aquest valor amb el corresponent a la mesura trimestral del tercer període de la campanya, $(171 \pm 19) \text{ Bq m}^{-3}$, es comprova que és lleugerament més elevat. Això indica que la concentració de radó experimenta variacions significatives durant un període de tres mesos. D'aquí es desprèn la importància d'haver integrat durant un llarg període de temps a l'hora de determinar el valor mig anual de la concentració de radó, ja que amb una mesura puntual només s'obté una primera aproximació al nivell de radó. Tal i com es desprèn d'alguns resultats de la campanya, és possible que el valor mesurat sigui fins a dos ordres de magnitud diferent del que s'obté amb un període de mesura més llarg.

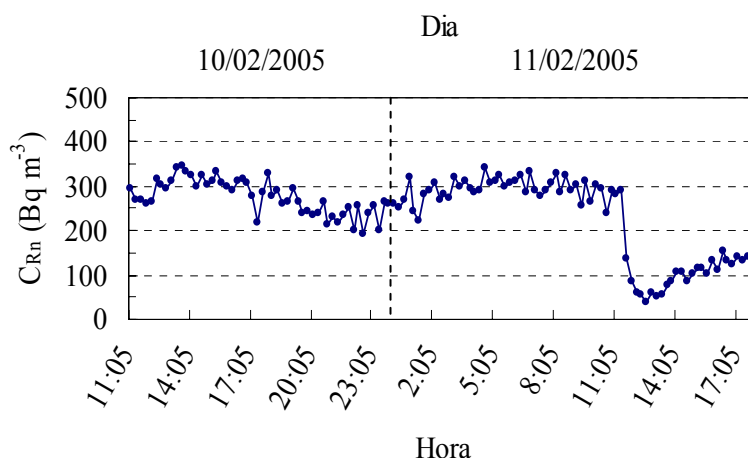


Figura 5.3. Nivells de radó mesurats en continu a l'interior del recinte 42.

Durant les primeres 24 hores de mesura, la concentració de radó va experimentar unes lleugeres variacions. Al migdia és un dels dos moments en que la concentració de radó va arribar al seu valor màxim, durant la tarda-vespre va disminuir, durant la nit va tornar a augmentar i pels voltants de les 6 de la matinada hi va haver l'altre màxim. A partir de les 11 del matí del segon dia el nivell de radó va experimentar una gran disminució. Això posa de manifest que el fet d'obrir les finestres de la sala va tenir un efecte important sobre la concentració de radó. La mesura va durar poques hores més i casualment també es van produir canvis meteorològics que podien afectar de forma significativa el nivell de radó de la sala, com són les variacions de la pressió atmosfèrica, la temperatura i la humitat. A la **Figura 5.4** apareix l'evolució temporal de la temperatura, en °C, la humitat relativa, en %, i la pressió atmosfèrica, en hPa, de l'interior del recinte mesurada amb l'estació meteorològica del GFR i les mateixes variables de l'aire exterior, mesurades per l'estació automàtica del SMC situada a Olot. Es comprova que la temperatura i la humitat interiors es mantenen constants mentre que el comportament de la pressió atmosfèrica de l'interior del recinte és el mateix que a l'exterior, amb una diferència de 5 hPa. Això va permetre comprovar que el baròmetre de l'estació meteorològica del GFR no estava correctament calibrat. Aquestes tres variables meteorològiques són responsables, en major o menor grau, de canvis en la diferència de pressió entre l'aire del sòl i l'aire de l'interior del recinte. En aquest cas una variació de pocs graus de la temperatura, del 60 % de la humitat o de 4 hPa en la pressió podien afavorir l'entrada de radó a l'interior del recinte, anul·lant l'efecte de la ventilació més ràpid del què hauria estat amb condicions meteorològiques estables. Com que no es va poder observar si la concentració de radó arribava a un nivell semblant del que hi havia abans de la ventilació ni determinar el temps que tardava en fer-ho, es va creure interessant tornar a repetir la mesura, però aquest cop allargant el temps d'exposició uns dies més.

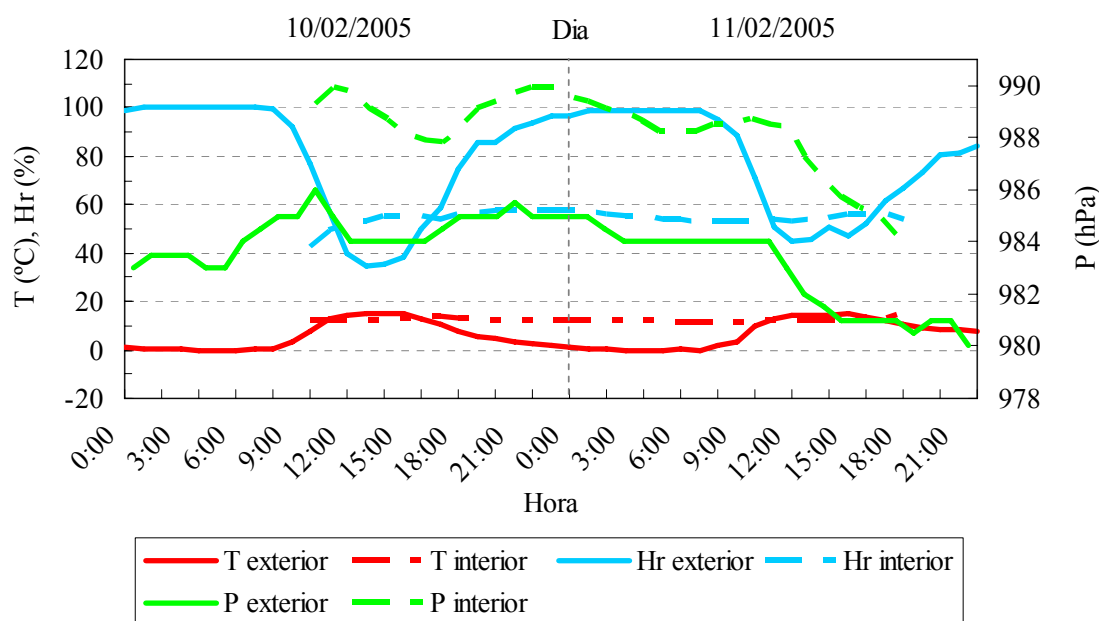


Figura 5.4. Evolució temporal de la temperatura, T, la humitat relativa, Hr, i la pressió atmosfèrica, P, de l'aire de l'interior del recinte 42, mesurat amb l'estació meteorològica del GFR, i de l'aire exterior, mesurat per l'estació automàtica del SMC situada a Olot.

Resultats de la 2^a etapa.

Els nivells de radó mesurats de forma continua amb el PRASSI durant els 10 dies apareixen a la **Figura 5.5**. La concentració de radó del recinte, en els períodes de temps que no influeix la ventilació forçada, experimenta variacions dins el rang $[150 - 400] \text{ Bq m}^{-3}$. Cada vegada que s'ha obert una finestra per incrementar la ventilació la concentració de radó disminueix ràpidament fins gairebé anul·lar-se. El primer dia, després de tenir la finestra oberta durant una hora, la concentració de radó només triga una hora en assolir un nivell semblant de la concentració de radó abans de la ventilació. El dia 10 de maig, després de tenir la finestra oberta durant una hora i quart, la concentració de radó es manté oscil·lant al voltant dels 100 Bq m^{-3} durant 4 hores i després comença una lenta recuperació que dura 3 hores fins assolir els 200 Bq m^{-3} . L'endemà es produeix un efecte semblant, després de tenir la finestra oberta durant una altra hora, la concentració de radó es manté oscil·lant al voltant dels 60 Bq m^{-3} durant 4 hores i després retorna als 200 Bq m^{-3} en menys de 2 hores. Finalment, el dia 14 de maig a la tarda la finestra està oberta durant dues hores seguides. Primer s'observa una disminució de la concentració durant 3 hores, fins arribar a un nivell inferior als 25 Bq m^{-3} , i després un augment durant 4 hores fins assolir un nivell semblant al de l'inici de la ventilació. El monitor PRASSI va continuar mesurant la concentració de radó fins el 18 de maig, dia de la seva recollida, però no es té constància del què va poder provocar la disminució de la concentració del dia 15 de maig a les 12 del migdia. És molt probable que es tractés de l'obertura d'una o varies finestres durant molta estona, fet que va provocar l'augment de la ventilació a l'interior del recinte.

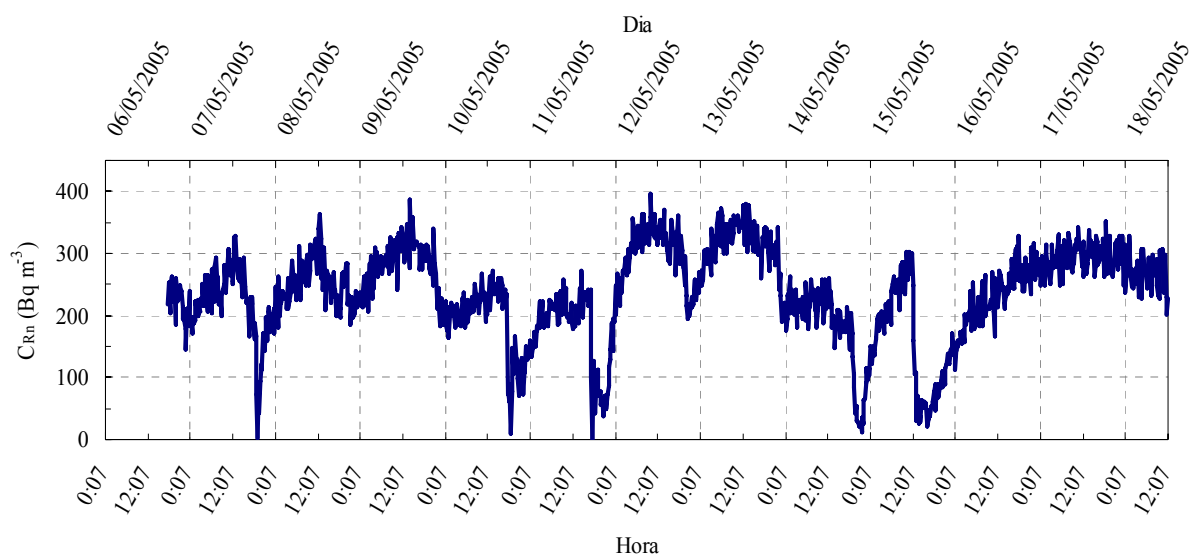


Figura 5.5. Els nivells de radó mesurats en continu durant 10 dies amb el monitor de radó PRASSI a l'interior del recinte 42 per comprovar l'efecte de la ventilació.

Tot i que els nivells de radó mesurats no es troben dins el rang $500\text{-}1500 \text{ Bq m}^{-3}$ (recomanat per la ICRP per establir els nivells d'acció en llocs de treball) i, per tant, no és necessari realitzar-hi cap actuació especial, s'ha comprovat que la ventilació resulta ser una bona tècnica de mitigació per aquest recinte, per tant, si es volgués reduir el nivell de radó s'hauria de ventilar el recinte un mínim de dues hores diàries, preferiblement durant les hores centrals del dia, que és quan la concentració de radó presenta els valors més elevats.

Durant aquesta segona etapa de mesura les condicions meteorològiques van experimentar canvis més importants que en la primera etapa, veure la **Figura 5.6**, sobretot la pressió atmosfèrica i la humitat. Amb l'ajut d'un model de la dinàmica del radó a l'interior de recintes, com el RAGENA, que tingui en compte la influència d'aquests i molts altres paràmetres, es podria interpretar de forma satisfactòria tots aquests resultats, però això ja s'escapa dels objectius d'aquest treball.

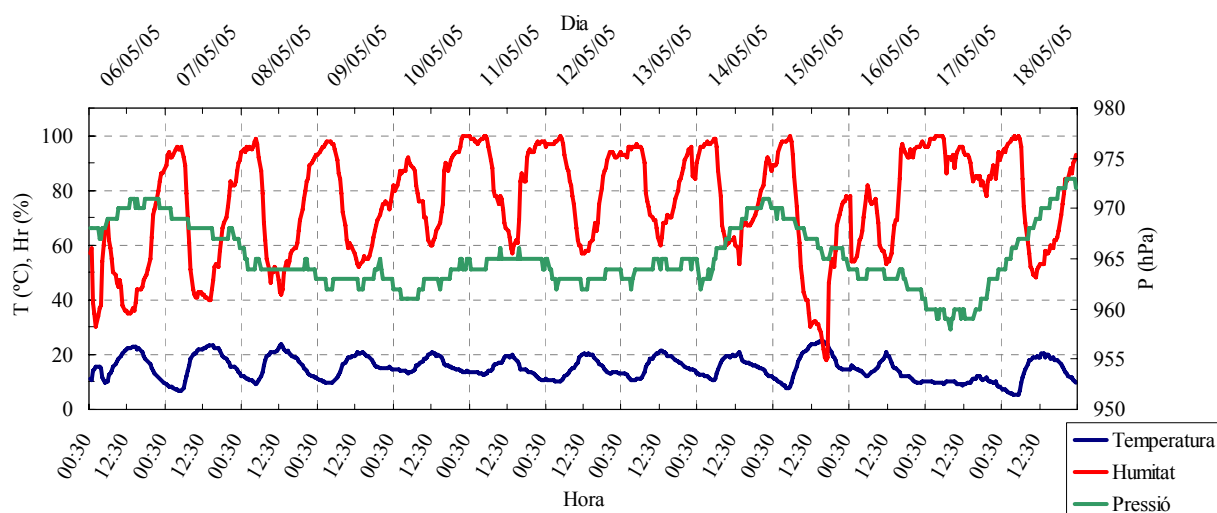


Figura 5.6. Evolució temporal de la temperatura, T, la humitat relativa, Hr, i la pressió atmosfèrica, P, de l'aire exterior del recinte 42, mesurat per l'estació automàtica del SMC situada a Olot.

5.2.2. El recinte 8.

Aquest recinte és un petit despatx situat en un edifici que depèn de l'ajuntament d'Olot. Està situat a una planta baixa i no disposa de gaire ventilació. Les persones que treballen en aquest recinte normalment hi són per les tardes de dilluns a divendres.

Metodologia.

Un cop finalitzada la campanya de mesura de la concentració de radó amb els dosímetres de Makrofol ens vàrem posar en contacte directament amb el responsable d'aquest recinte per poder-hi realitzar una mesura en continu. Entre els dies 14 i 30 de novembre del 2005 el monitor PRASSI va estar mesurant la concentració de radó en el seu interior. En aquest cas no es va demanar als col·laboradors que intervinguessin de cap forma especial en la ventilació del recinte sinó que es va deixar que actuessin segons els seus hàbits. Es va deixar el PRASSI en un punt del recinte apartat de les principals obertures.

Resultats.

A la **Figura 5.7** es mostra els nivells de radó mesurats de forma continua amb el PRASSI durant 16 dies i a la **Figura 5.8** tenim la variació de les condicions meteorològiques (temperatura, humitat relativa i pressió atmosfèrica) mesurades pel l'estació automàtica del SMC situada a Olot.

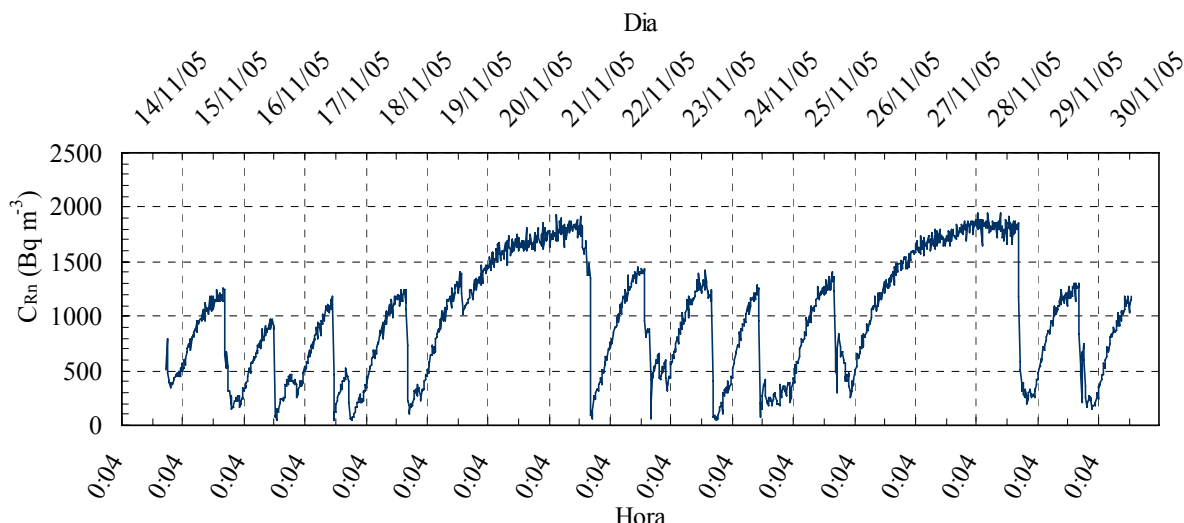


Figura 5.7. Els nivells de radó mesurats en continu durant 16 dies amb el monitor de radó PRASSI a l'interior del recinte 8 per comprovar l'efecte de la ventilació.

A la **Figura 5.7** s'observa que la concentració de radó va experimentar grans variacions diàries. Existeix un patró de variacions que es repeteix de forma setmanal i un altre patró de 24 h que es repeteix de dilluns a divendres. De forma general, la concentració de radó augmenta durant la nit, el matí i part de la tarda, fins que de sobte disminueix ràpidament. Aquest canvi es produeix en el moment que s'obre la porta del recinte per entrar a treballar, al voltant de les 16 h. Durant unes 8 hores la concentració de radó es mantenia bastant per sota dels 500 Bq m⁻³ i pels voltants de la mitja nit superava de nou aquest valor. De dilluns a divendres la concentració de radó només arribava fins a nivells entre 1000 i 1400 Bq m⁻³. En canvi, durant els caps de setmana, quan la ventilació era molt més baixa o nul·la, els nivells de radó augmentaven fins uns 1800 Bq m⁻³. En el primer cap de setmana, corresponent als dies 19 i 20 de novembre, es va mesurar una petita disminució de la concentració de radó al voltant del migdia del dissabte. Aquesta variació, que també va ser provocada per la ventilació, corresponia al moment en que un treballador va accedir dins del recinte i va tenir la porta oberta durant una estona. A partir d'aquests resultats es va comprovar que, de tots els paràmetres que intervenien a la variació de la concentració de radó en aquest recinte, el més influent és la ventilació a través de les portes i finestres. En aquest cas la influència dels paràmetres meteorològics (**Figura 5.8**) no es va poder observar, degut segurament a les característiques estructurals del recinte, ja que entre els seus materials de construcció apareixen aïllants recobrint les parets interiors i ajustant les portes que comuniquen les diferents dependències de l'edifici, la qual cosa pot provocar un cert aïllament de les condicions meteorològiques exteriors.

El valor mig de la concentració de radó mesurada de forma continua amb el PRASSI durant 16 dies va ser de 973 Bq m⁻³, amb un rang de valors de [39 – 1950] Bq m⁻³. Comparant aquest valor amb el corresponent resultat del tercer període d'exposició de 3 o 4 mesos obtingut amb dels dosímetres de Makrofol (819 ± 70) Bq m⁻³, es comprova que és lleugerament més elevat però compatible, si es té en compte que la durada dels períodes de mesura no va ser la mateixa.

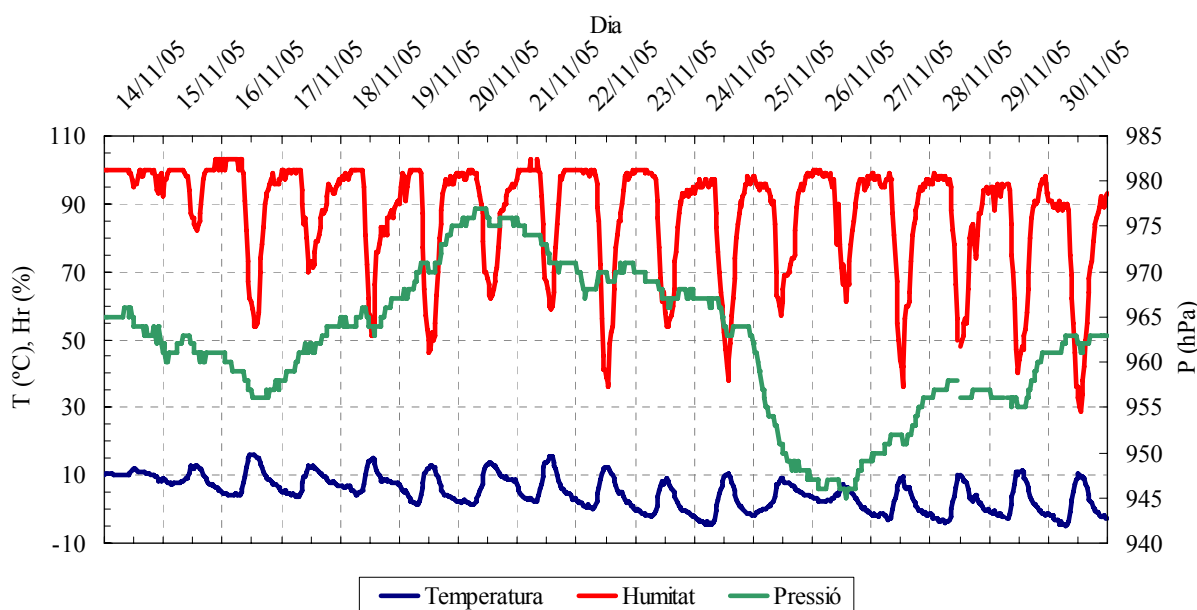


Figura 5.8. Evolució temporal de la temperatura, T, la humitat relativa, Hr, i la pressió atmosfèrica, P, de l'aire exterior del recinte 8, mesurat per l'estació automàtica del SMC situada a Olot.

Com que es va observar que la concentració de radó augmentava durant les nits i els caps de setmana, aleshores, el valor mig de la concentració de radó durant les hores laborables del recinte havia de ser més baix. Per tant, considerant els nivells de radó mesurats entre les 16 i les 22 h de dilluns a divendres, aquest valor mig és de 358 Bq m^{-3} amb una desviació estàndard de 200 Bq m^{-3} , i es comprova que és gairebé 3 vegades més petit que la concentració mitja dels 16 dies. Per tant, aquest és un clar exemple de lloc de treball on la concentració de radó mesurada durant un llarg període d'exposició amb un dosímetre passiu és molt més elevada que la concentració de radó a que estan sotmesos realment els treballadors d'aquest recinte. Aleshores, només que es mantinguin els mateixos hàbits de ventilació ja és suficient per reduir la concentració i resulta innecessari aplicar mesures addicionals de mitigació. Aquest fet ja s'ha observat anteriorment en altres llocs de treball (Kávási et al., 2006) i justifica clarament la necessitat de dur a terme algunes mesures en continu durant períodes curts (d'unes 2 setmanes) en aquells llocs on la concentració mesurada amb els dosímetres passius és més elevada. En aquests casos seria raonable introduir factors de correcció per convertir els nivells mesurats les 24 hores del dia en nivells corresponents a les hores efectives de treball (Harley i Terilli, 1990).

5.3. Interès geofísic dels nivells de radó.

5.3.1. Estudi dels nivells de radó en funció del tipus de material del sòl i el subsòl.

En els següents apartats d'aquest treball es fa servir el terme subsòl per anomenar el tipus de substrat sobre el què estan construïts els recintes estudiats i ens indica si és d'origen volcànic o no. En canvi, el terme sòl s'utilitza per anomenar el material que hi ha directament en contacte amb els fonaments d'un recinte. Aquest terme pot tenir dos nivells de classificació: un de general on es distingeix entre materials volcànics, sediments quaternaris, substrat terciari o paleozoic, i un altre de

més concret, on es distingeix entre els diferents tipus de materials volcànics (piroclastos i colades de lava) i de dipòsits quaternaris (dipòsits lacustres i dipòsits al·luvials i col·luvials). En el capítol 4 hi ha una descripció detallada de cadascun d'aquests tipus de materials.

La classificació dels recintes estudiats segons el tipus de sòl i de subsòl s'ha a partir de la informació que proporcionen els mapes geològics de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) i amb la col·laboració del Dr. Joan Bach del Departament de Geologia de la UAB. A les **Taules D.3** de l'Annex D es mostren els codi i els resultats anuals dels recintes d'Olot amb els valors de les mitges aritmètica i geomètrica tenint en compte el tipus de sòl i subsòl sobre el que estan construïts. Anàlogament, a la **Taula D.4** es mostren aquest resultat pels recintes de La Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles i a la **Taula D.5** pels recintes d'Amer. En el cas d'Olot es confirma el resultat de la campanya preliminar, pel qual els nivells de radó més elevats es troben en recintes construïts sobre materials volcànics, especialment en els situats sobre colades de lava.

Dues tercers parts dels recintes estudiats estan construïts sobre subsòl volcànic i la resta sobre no volcànic. Calculant les mitges aritmètica i geomètrica de la concentració de radó de tots els recintes que estan construïts sobre un mateix tipus de sòl i subsòl s'obtenen els resultats de la **Taula 5.6**.

Taula 5.6. Valors de les mitges aritmètica i geomètrica de la concentració de radó en els recintes que estan construïts sobre un mateix tipus de sòl i de subsòl .

Nombre de recintes	Sòl	Rang valors (Bq m ⁻³)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$ (Bq m ⁻³)	Subsòl	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$ (Bq m ⁻³)
51	Material volcànic	18 - 1464	144 ± 37	75 ± 3	Volcànic	133 ± 26	72 ± 3
30	Sediments quaternaris	15 - 742	113 ± 29	68 ± 2			
35	Sediments quaternaris	16 - 327	68 ± 13	48 ± 2	No volcànic	67 ± 11	49 ± 2
9	Substrat terciari o paleozoic	18 - 165	64 ± 16	51 ± 2			

La mitja aritmètica de les concentracions de radó obtingudes en recintes construïts sobre subsòl volcànic és el doble que la dels recintes construïts sobre subsòl no volcànic. La mitja geomètrica també és superior en el cas dels recintes amb subsòl volcànic. En promig els recintes que presenten nivells més elevats són els que estan construïts directament sobre materials volcànics. En canvi, els que presenten nivells més baixos són els que estan construïts directament sobre el substrat de la roca sedimentària o metamòrfica. D'aquests resultats també es desprèn que els nivells de radó en els recintes construïts sobre capes de sediments amb un subsòl volcànic són més grans que els dels recintes sobre sediments amb un subsòl no volcànic.

Comparació Olot – Vall d'en Bas

Comparant els pobles d'Olot i la Vall d'en Bas es pot analitzar millor la influència dels diferents tipus de materials sobre la concentració de radó en els recintes estudiats. Olot es caracteritza per tenir un subsòl volcànic i és on es troba gairebé la meitat dels recintes estudiats i la Vall d'en Bas es caracteritza per tenir un subsòl completament no volcànic i és el poble estudiat més pròxim a Olot. En els altres pobles estudiats la distinció entre subsòl volcànic i no volcànic no és tan clara com en

aquests dos municipis. A la **Taula 5.7** apareixen els resultats d'Olot i la Vall d'en Bas fent una classificació més detallada segons el tipus de sòl, és a dir, diferenciant els dos tipus de materials volcànics (piroclastos i colades de laves) i els dos tipus de sediments quaternaris (lacustres i al·luvials o col·luvials).

Taula 5.7. Valors de les mitges aritmètica i geomètrica de la concentració de radó en els recintes d'Olot i La Vall d'en Bas que estan construïts sobre un mateix tipus de sòl i subsòl.

Nombre de recintes	Rang C_{Rn} (Bq m ⁻³)	Tipus de sòl (concret)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$	Tipus de sòl (general)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$	Tipus de subsòl	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$
19	23 - 569	Dipòsits piroclàstics	105 ± 29	70 ± 2	Material volcànic	162 ± 46	81 ± 3	Volcànic	161 ± 37	82 ± 3
22	22 - 1464	Colades de lava	212 ± 81	92 ± 3						
13	17 - 742	Dip. lacustres	170 ± 62	89 ± 3	Sediments Quaternaris	157 ± 54	86 ± 3			
2	44 - 107	Dip. al·luvials i col·luvials	76 ± 31	-						
5	19 - 62	Dip. lacustres	36 ± 8	33 ± 2	Sediments quaternaris	50 ± 8	41 ± 2	No volcànic	56 ± 9	45 ± 2
10	17 - 135	Dip. al·luvials i col·luvials	56 ± 11	46 ± 2						
6	18 - 165	Roca sedimentària	73 ± 23	55 ± 2	Substrat terciari	73 ± 23	55 ± 2			

En aquest cas, la diferència entre els valors mitjos de la concentració de radó dels recintes construïts sobre subsòl volcànic i no volcànic és més gran. Els recintes amb subsòl volcànic construïts directament sobre colades de lava presenten valors més grans que els construïts sobre dipòsits piroclàstics. Els recintes construïts sobre sediments lacustres d'Olot presenten un valor mig de la concentració de radó més elevat que el dels recintes construïts sobre dipòsits al·luvials o col·luvials, tot i que l'estadística en el segon cas és molt petita (2 recintes). A la Vall d'en Bas, en canvi, s'observa el cas oposat però amb uns valors més baixos.

5.3.2. Estudi dels nivells de radó en funció de la distància a la Falla d'Amer.

Observant el paisatge de la zona estudiada es veu el canvi de nivell en el terreny que va provocar la formació de la Falla d'Amer, veure la **Figura 4.5**. Actualment, però, la zona exacte per on passa la falla està recoberta per importants gruixos de sediments del Quaternari (dipòsits al·luvials i col·luvials), a simple vista no és visible i es diu que està fossilitzada. A partir de la informació que proporcionen els mapes geològics de la zona (ICC 1997) s'ha determinat la posició aproximada a la falla a cadascun dels quatre nuclis urbans més pròxims a ella. Les distàncies a la falla de cadascun dels recintes estudiats han estat calculades a partir de les seves coordenades geogràfiques i d'aquesta posició teòrica de la falla. És per aquest motiu que les incerteses d'aquestes distàncies són molt grans. A la última columna de la **Taula D.1** de l'Annex D es mostren les distàncies de tots els recintes estudiats respecte de la falla d'Amer, excepte pels d'Olot, on els recintes es troben a més de 5 km de la falla. A la **Figura 5.9** estan representats tots els valors de la concentració de radó dels recintes dels 4 pobles estudiats en funció de la distància a la falla. Amb tots els resultats junts no s'observa cap relació entre els nivells de radó a l'interior dels recintes i la distància a la falla. Sembla que la dispersió de valors és més gran a prop de la falla.

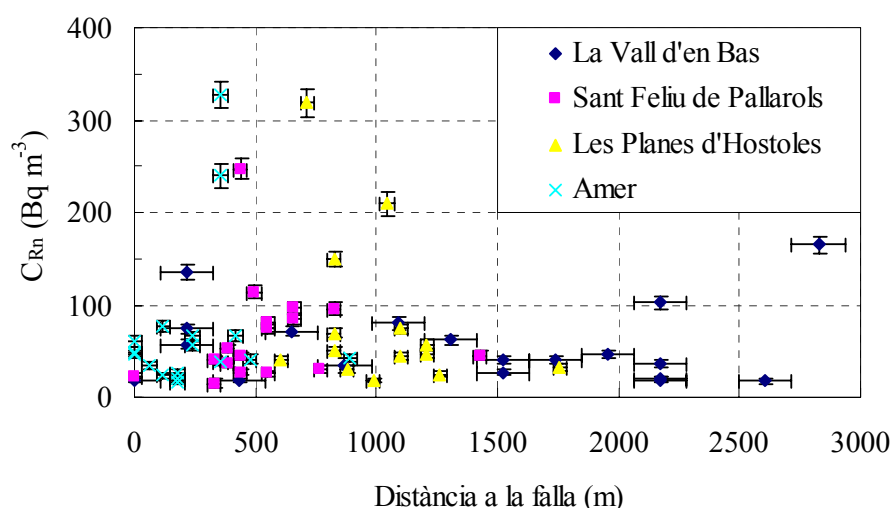


Figura 5.9. Valors de la concentració de radó dels recintes dels 4 pobles estudiats en funció de la distància a la falla d'Amer.

Si suposem que la falla d'Amer és la via a través de la qual el radó, procedent del mantell, viatja fins arribar a l'aire atmosfèric, quan aquest gas es troba amb una capa de sediments recobrint la falla es produirà un transport a través d'aquests materials. Aquest transport serà més o menys afavorit en funció de les característiques dels materials que constitueixen aquestes capes de sediments. En qualsevol cas, el radó viatja amb més facilitat a través de la capa de sediments dipositats al fons de la vall que no pas per les roques que formen el substrat terciari o paleozoic. De fet, si només es representen els resultats dels recintes construïts sobre sediments, **Figura 5.10**, es pot veure millor la influència de la falla en la concentració de radó d'aquests recintes. S'observa que en els primers 1000 m al voltant de la falla la dispersió de valors és gran. A partir dels 1000 m, els valors tendeixen a disminuir.

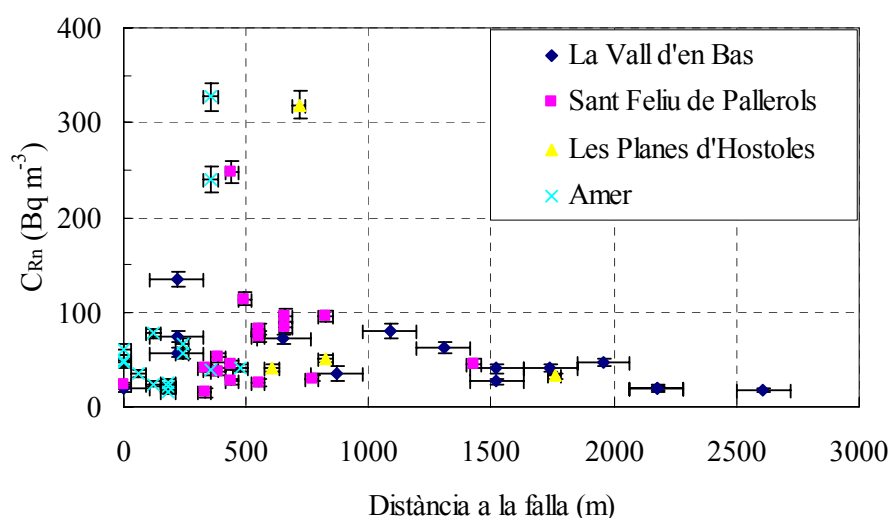


Figura 5.10. Valors de la concentració de radó dels recintes situats sobre sediments quaternaris dels 4 pobles estudiats en funció de la distància a la falla d'Amer.

Poble per poble.

El transport del radó es complica quan aquest troba vàries capes de materials amb unes característiques molt diferents les unes de les altres. Això és el que passa sobretot en el subsòl dels pobles de Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles. En aquests dos municipis hi ha recintes que es troben directament sobre materials volcànics, altres sobre el substrat terciari i la majoria sobre dipòsits sedimentaris del Quaternari. La distribució d'aquests materials es coneix a partir de la informació que proporcionen els mapes geològics, que és el que ha permès fer la classificació anterior dels recintes segons el tipus de sòl i de subsòl, però es tracta d'informació aproximada. En alguns casos no és fàcil determinar si sota una capa de sediments es troba directament el substrat terciari o una capa de materials volcànics i encara menys determinar-ho sota un recinte concret. Per treure unes conclusions clares sobre la influència de la falla en la concentració de radó dels recintes d'aquests dos pobles seria necessari disposar d'una estadística de punts més gran i una informació més detallada dels gruixos i amplades de les diferents capes de materials que es troba el radó des de la falla fins a la superfície.

Pel que respecta al terme municipal de la Vall d'en Bas, tots els recintes estudiats es troben sobre subsòl no volcànic (4 directament sobre el substrat terciari i 15 sobre una capa de sediments quaternaris). Si representem només els resultats dels recintes construïts sobre sediments quaternaris, s'obté la gràfica de la **Figura 5.11**. En aquest cas es pot observar millor la possible influència de la falla, ja que la dispersió de valors és gran a distàncies petites, disminueix a mesura que augmenta la distància i els nivells de radó tendeixen a decreixer amb la distància. Per tant, aquests resultats són una prova que confirma la hipòtesis de que la font de radó pot ser la falla d'Amer.

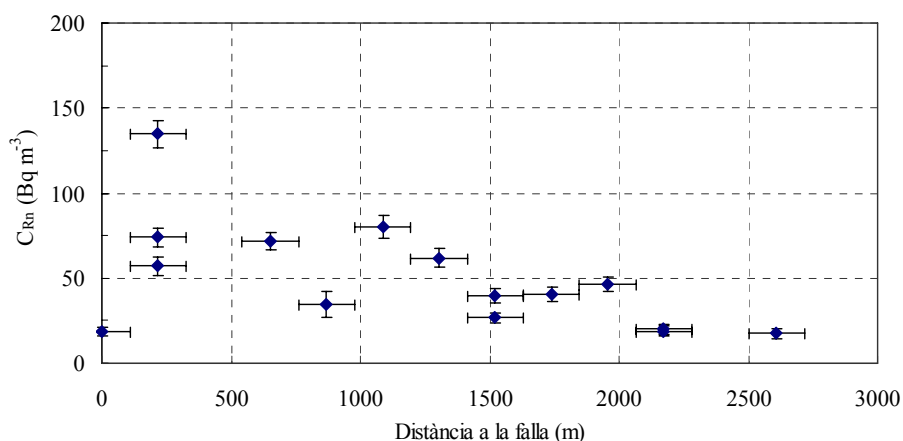


Figura 5.11. Valors de la concentració de radó dels recintes situats sobre sediments quaternaris del municipi de la Vall d'en Bas en funció de la distància a la falla d'Amer.

Com en el cas de la Vall d'en Bas, tots els recintes d'Amer també estan construïts sobre subsòl no volcànic i la majoria sobre dipòsits sedimentaris del Quaternari. Teòricament la falla passa pel centre de la vall, aproximadament paral·lela a la carretera que travessa el poble en direcció N-O, per tant, tenim 3 recintes a l'est de la falla, 2 a la vertical i 10 a l'oest. Per representar gràficament els resultats d'aquest poble, en la **Figura 5.12**, s'ha considerat que la falla passa per l'origen d'abscisses i

els recintes de l'oest de la falla tenen distàncies negatives. En aquest cas, però, no s'observa cap influència de la falla amb els nivells de radó.

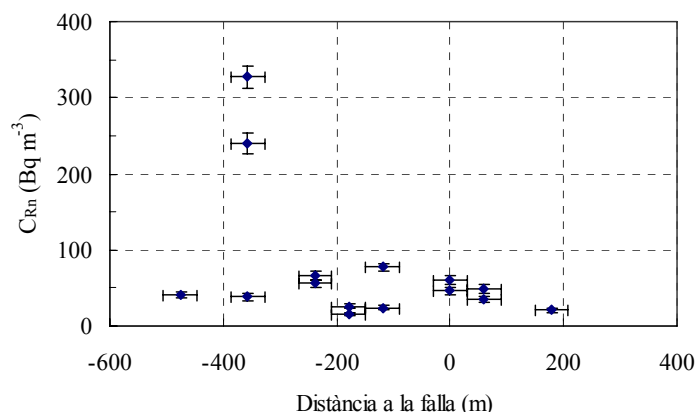


Figura 5.12. Valors de la concentració de radó dels recintes situats sobre sediments quaternaris del municipi d'Amer en funció de la distància a la falla d'Amer.

5.3.3. Estudi de les variacions estacionals de la concentració de radó.

Al principi de la campanya, transcorregut el primer període d'exposició, s'havia establert el criteri de substituir cada tres o quatre mesos tots els dosímetres que havien mesurat una concentració de radó superior a 55 Bq m^{-3} . En finalitzar la campanya un total de 53 recintes havien estat mesurats en 4 període curts. A partir dels seus resultats es va veure que es podia fer un estudi de les variacions estacionals de la concentració de radó. Les mitges aritmètiques de la concentració de radó per cada període d'exposició dels recintes de què es disposa de 4 mesures apareixen a la **Taula 5.8** i a la **Figura 5.13**, on es pot veure l'evolució temporal.

Taula 5.8. Valors de les mitges aritmètiques de la concentració de radó per cada període d'exposició dels 53 recintes de què es disposa de 4 mesures, amb períodes d'exposició entre 3 i 4 mesos.

Període	1r	2n	3r	4rt
$C_{Rn} \text{ (Bq m}^{-3}\text{)}$	249 ± 72	223 ± 40	156 ± 26	184 ± 29

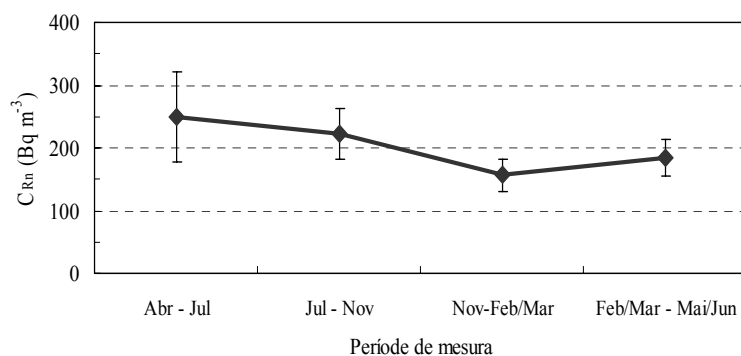


Figura 5.13. Evolució temporal del valor mig de la concentració de radó dels 53 recintes de què es disposa de 4 mesures, amb períodes d'exposició entre 3 i 4 mesos.

En promig la concentració de radó tendeix a ser més elevada els dos primers períodes de mesura i més baixa els dos següents. Aquest comportament és diferent del que era d'esperar ja que normalment en els recintes tancats la concentració de radó és més gran a l'hivern que a l'estiu, degut a la menor ventilació dels recintes durant els mesos freds de l'any (Miles, 2001; Kullab, et al., 2001). Això posa de manifest que cal anar amb molt de compte a l'hora d'aplicar factors correctors estacionals de forma generalitzada.

Analitzant amb més detall els resultats s'han observat diferents comportaments de la concentració de radó i s'ha pogut classificar els 53 recintes estudiats en tres grups:

Grup 1: la concentració de radó augmenta a l'estiu i disminueix a l'hivern (26 recintes).

Grup 2: la concentració augmenta a l'hivern i disminueix a l'estiu (17 recintes).

Grup 3: la concentració de radó varia poc a llarg de l'any (10 recintes).

A la **Figura 5.14** apareixen els resultats de tots els recintes que tenen un comportament del grup 1, a la **Figura 5.15** els del grup 2 i a la **Figura 5.16** els del grup 3. S'han representat tots els resultats com variacions respecte del valor mig anual de cada recinte, és a dir, s'ha dividit el resultat de cada període pel seu valor mig anual per obtenir la concentració de radó relativa. El criteri per diferenciar els comportaments dels grups 1 i 2 dels del grup 3 ha estat determinar els recintes que tenien algun dels quatre valors de la concentració relativa de radó fora del rang [0.75-1.25] i els que no tenien cap resultat fora d'aquest rang formen part del grup 3.

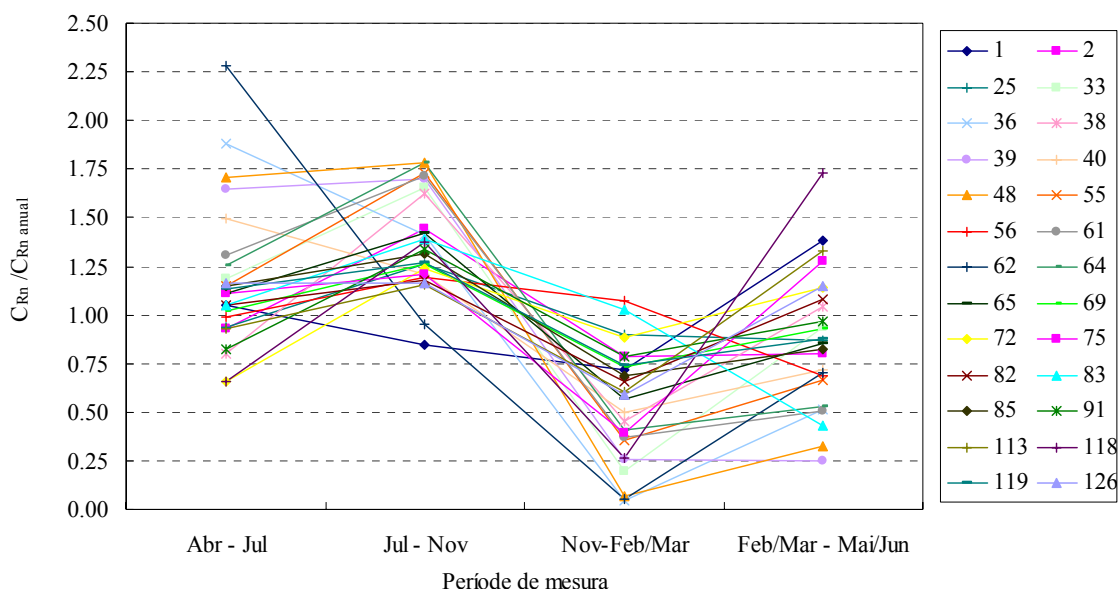


Figura 5.14. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes del Grup 1 (presenten un màxim en els períodes 1-2 i un mínim en els períodes 3-4).

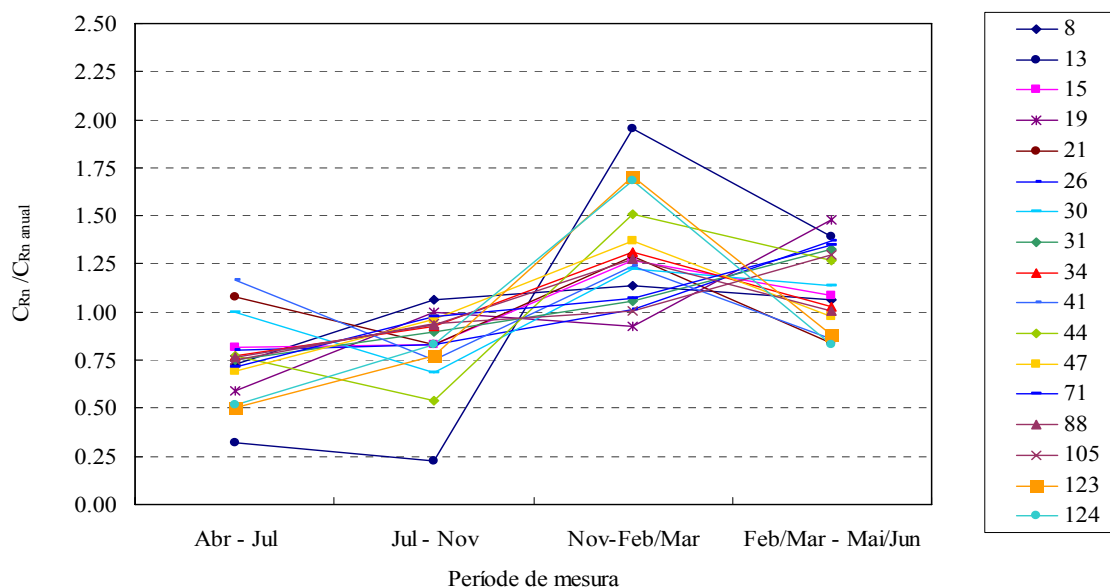


Figura 5.15. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes del Grup 2 (presenten un mínim en els períodes 1-2 i un màxim en els períodes 3-4).

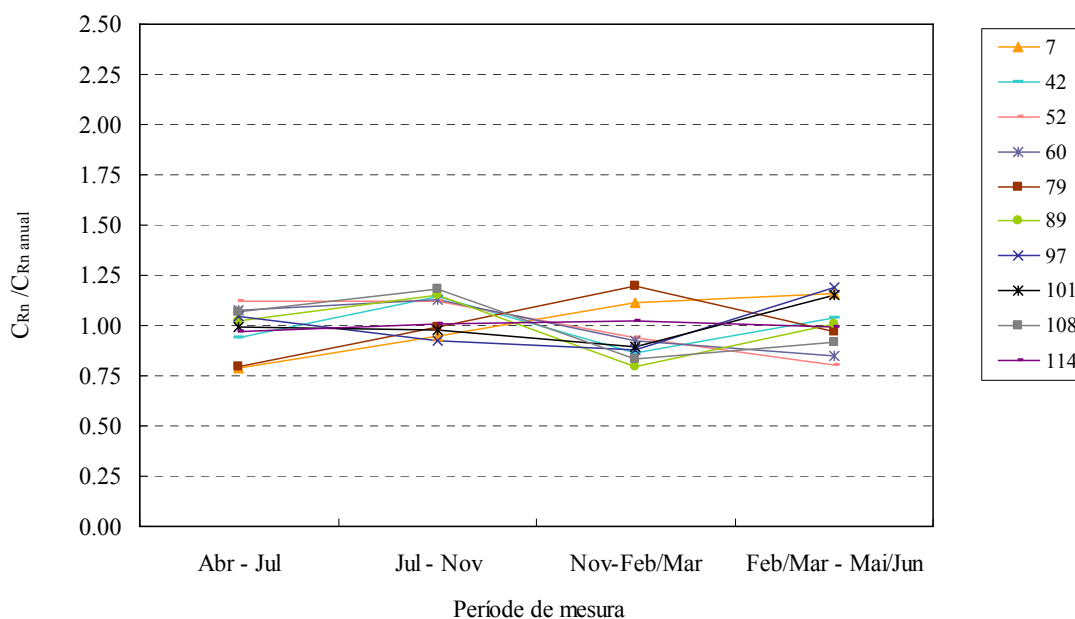


Figura 5.16. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes del Grup 3 (no presenten cap màxim i mínim fora del rang [0.75-1.25])

Relació amb les característiques del recinte.

S'ha volgut comprovar si existeix alguna relació de la variació estacional amb les característiques del recinte i a la **Taula 5.9** es mostra el nombre de recintes de cada grup que tenen una mateixa categoria dins de cada característica. No s'ha trobat cap relació clara amb aquestes característiques. Només es pot destacar que més del 50% dels habitatges, dels soterranis, dels recintes grans i dels recintes amb ventilació baixa té un comportament dels nivells de radó equivalent al grup 1.

Taula 5.9. Nombre de recintes total i de cada grup que comparteixen una mateixa categoria dins de les diferents característiques dels recinte.

Característica del recinte	Categoria	Nº recintes Total	Nº recintes		
			Grup 1	Grup 2	Grup 3
Tipus	Lloc de treball	39	15	16	8
	Habitatge	14	11	1	2
Nivell	Soterrani o semi-soterrani	12	8	2	2
	Planta baixa o primera	41	18	15	8
Mida	Petit	18	8	6	4
	Mitjà	18	8	7	3
	Gran	17	10	4	3
Ventilació	Alta o molt alta	5	2	3	-
	Normal	22	7	10	5
	Baixa o molt baixa	26	17	4	5

Relació amb les característiques del sòl.

S'ha volgut comprovar si existeix alguna relació de la variació estacional amb les característiques geològiques del sòl sobre el qual està construït el recinte. Primer s'ha classificat tots els recintes en funció del tipus de subsòl. Dels 53 recintes, 42 estan construïts sobre subsòl volcànic i 11 sobre subsòl no volcànic. Calculant el valor mig de cada període pels recintes amb el mateix tipus de subsòl s'obtenen els resultats que apareixen a la **Figura 5.17**.

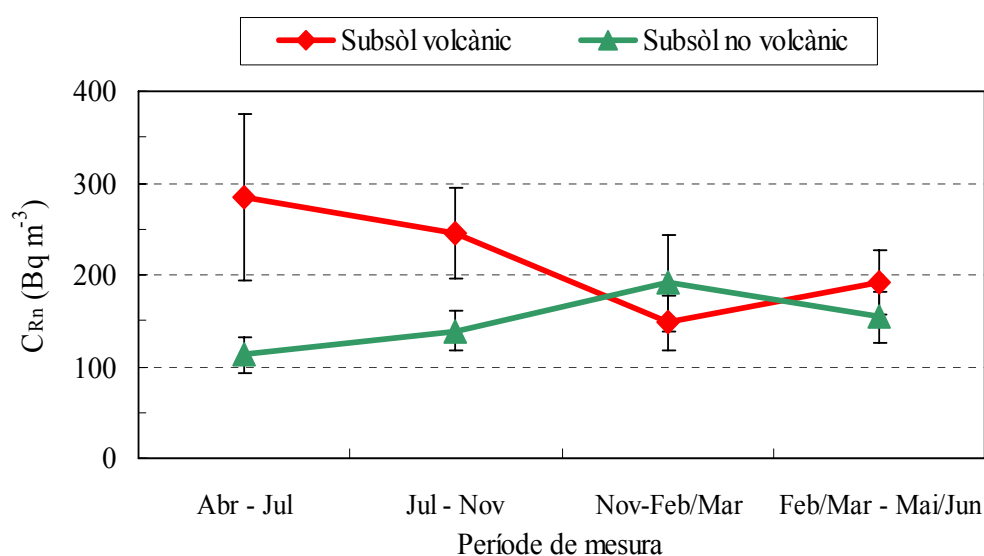


Figura 5.17. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels 54 recintes amb mesures trimestrals en funció del tipus de subsòl sobre el que estan construïts.

Es comprova que existeix una diferència important entre la variació estacional de la concentració de radó en funció del tipus de subsòl. Els recintes construïts sobre subsòl volcànics presenten els nivells de radó més elevats a l'estiu i més baixos a l'hivern mentre que els recintes sobre subsòl no volcànic presenten el comportament oposat. Per tant, es pot dir que, en promig, els recintes sobre subsòl no volcànic tenen un comportament del grup 1 i els recintes sobre subsòl volcànic del grup 2.

La **Taula 5.10** ens informa del nombre de recintes de cada grup classificats segons el tipus de sòl i subsòl. Un total de 25 recintes, és a dir, el 60 % dels recintes construïts sobre subsòl volcànic pertanyen al grup 1. Per altra banda, el 46 % dels recintes construïts sobre subsòl no volcànic pertanyen al grup 2. En el cas dels recintes del grup 1, la meitat estan construïts directament sobre materials volcànics (piroclastos i laves), en canvi, en el grup 2, dos tercers parts dels recintes estan construïts sobre sediments (lacustres i al·luvials), ja sigui amb subsòl volcànic o no.

Taula 5.10. Nombre de recintes que de cada grup classificats segons el tipus de sòl i subsòl sobre el que estan construïts.

Grup	Nombre de recintes			
	Subsòl volcànic	Tipus de sòl	Subsòl no volcànic	Tipus de sòl
1	25 (60 %)	6 – piroclast 8 – lava 2 – dipòsit lacustre 9 – dipòsit al·luvial	2 (18 %)	2 – dipòsit al·luvial
2	11 (26 %)	2 – piroclast 3 – lava 5 – dipòsit lacustre 1 – dipòsit al·luvial	5 (46 %)	5 – dipòsit al·luvial
3	6 (14 %)	1 – piroclast 5 – lava	4 (36 %)	2 – dipòsit al·luvial 2 – substrat terciari

Distingint entre els recintes construïts directament sobre materials volcànics dels que estan al damunt d'una capa de sediments sobre el subsòl volcànic (veure **Figura 5.18**), s'observa que els primers presenten una variació estacional dels nivells de radó equivalent al grup 1, mentre que els recintes sobre sediments tenen poca variació estacional (grup 3).

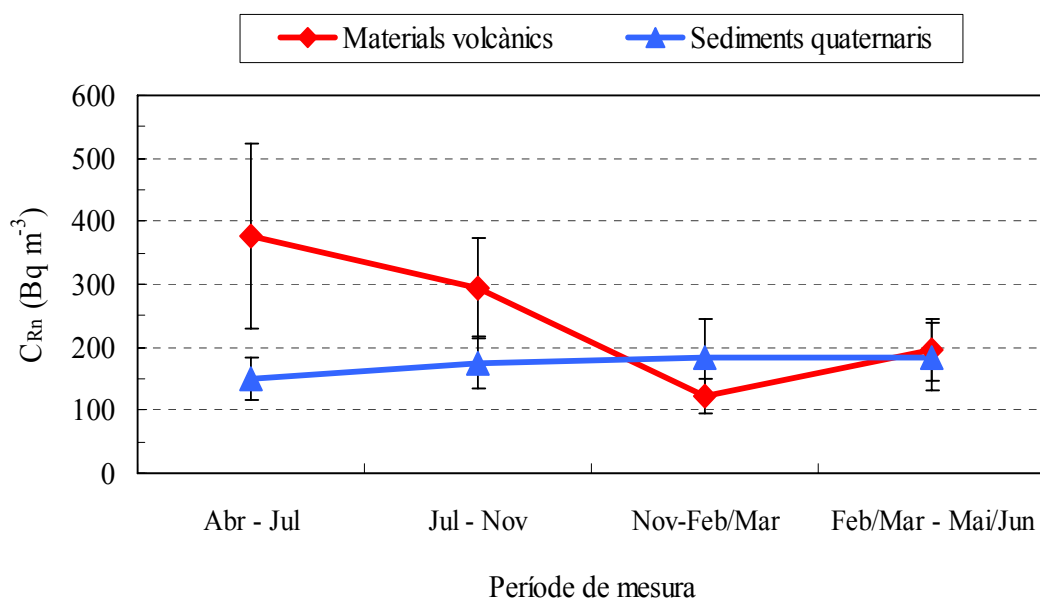


Figura 5.18. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes amb un subsòl volcànic en funció del tipus de sòl sobre el que estan construïts directament (materials volcànics o sediments quaternaris).

Fent la classificació més concreta del tipus de sòl, diferenciant entre els diferents tipus de materials volcànics o sedimentaris quaternaris sobre el subsòl volcànic (veure **Figura 5.19**), s'observa que els recintes construïts sobre laves són els que presenten una variació estacional més gran de la concentració de radó, amb un comportament del grup 1. Els recintes construïts sobre piroclastos també tenen una variació del grup 1, però és menys significativa que en el cas de les laves. Els recintes sobre dipòsits lacustres presenten una variació de la concentració de radó corresponent al grup 2 i, finalment, els recintes sobre dipòsits al·luvials gairebé no presenten variació (grup 3).

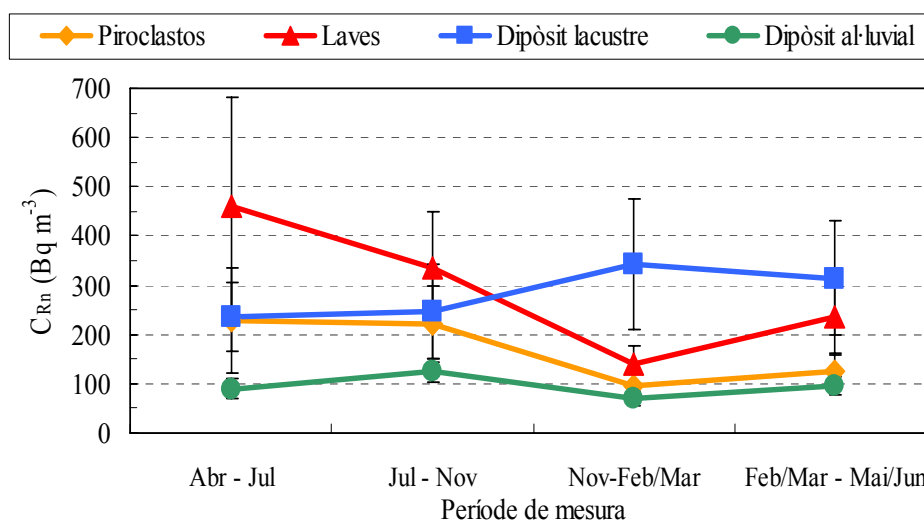


Figura 5.19. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes amb subsòl volcànic en funció del tipus concret de material sobre el que estan construïts (piroclastos, laves, dipòsits lacustres i dipòsits al·luvials).

Per altra banda, fent la distinció entre els recintes construïts directament sobre subsòl no volcànic (terciari o paleozoic) dels que tenen una capa de sediments sobre aquests substrats (**Figura 5.20**), s'observa que els primers presenten poca variació estacional dels nivells de radó, grup 3, i els segons presenten una variació estacional equivalent al grup 2.

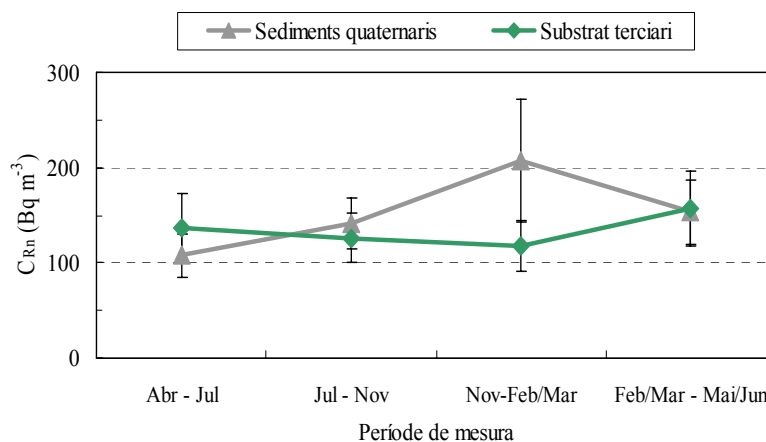


Figura 5.20. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes amb un subsòl no volcànic en funció del tipus de sòl sobre el que estan construïts directament (sediments quaternaris o substrat terciari).

Comparació Olot i La Vall d'en Bas.

Com que pràcticament tots els recintes estudiats d'Olot es troben sobre subsòl volcànic i tots els recintes de la Vall d'en Bas (que és el poble més pròxim a Olot) es troben sobre subsòl no volcànic, novament es fa una comparació entre aquests dos municipis, però aquest cop per veure les variacions estacionals dels nivells de radó en els seus recintes estudiats. A la **Figura 5.21** s'observa de forma més clara que els recintes construïts directament sobre materials volcànics presenten els nivells de radó més elevats a l'estiu i més baixos a l'hivern i, en canvi, els nivells de radó dels recintes sobre sediments quaternaris amb subsòl no volcànic es mantenen bastant constants al llarg de l'any, amb un lleuger augment a l'hivern. Finalment, els recintes sobre subsòl no volcànic (amb o sense capa de sediments) no presenten variacions estacionals significatives.

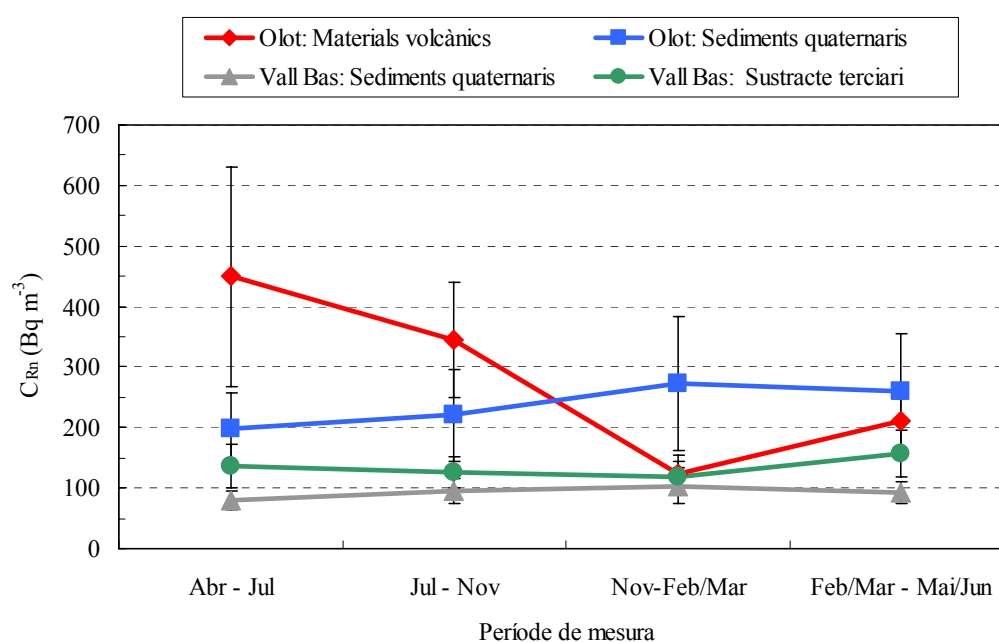


Figura 5.21. Valors mitjos de la concentració de radó en cada període de mesura dels recintes d'Olot i La Vall d'en Bas en funció del tipus de sòl sobre el que estan construïts directament.

5.3.4. Discussió dels resultats des del punt de vista de la Geofísica.

Influència del tipus de sòl sobre els nivells de radó.

Els resultats obtinguts indiquen una clara influència dels materials volcànics sobre els nivells de radó en els recintes tancats. Si bé, els nivells obtinguts són, en general, poc rellevants des del punt de vista de la protecció radiològica, tal i com s'ha comentat a l'apartat 5.1.2, la clara influència del tipus de sòl, independentment de les característiques estructurals del recinte i dels hàbits dels seus ocupants, és consistent amb la hipòtesis de que el radó prové de grans distàncies a través de materials amb alta permeabilitat. A la zona d'Olot és on s'han trobat els nivells de radó més elevats, coincidint amb un sòl majoritàriament volcànic, que no és especialment ric en radi. Ja s'ha comentat que en aquesta regió existeix un sistema de falles de diferent direcció i importància que en el seu moment van ser les responsables de les formacions volcàniques de la zona. Tot i que actualment no són actives

estan molt a prop d'una falla de la que hi ha molt indicis de que encara ho podria ser, la falla d'Amer. El fet que aquestes falles puguin estar connectades en algun punt de l'escorça terrestre amb la falla d'Amer pot proporcionar una explicació als nivells de radó elevats trobats a Olot. Si el radó mesurat procedeix de la desgasificació del mantell, inicialment deu viatjar a través de la falla d'Amer i al llarg del seu recorregut es deu escampar per algunes d'aquestes falles de menor importància. Aquestes fractures, lluny de tractar-se de canalitzacions perfectes, segurament formen un sistema complex amb diferents recorreguts, més o menys sinuosos, i que poden estar bloquejats pels materials volcànics que no van arribar a sortir a la superfície durant les successives erupcions del Quaternari. Aquestes laves fossilitzades també poden presentar fractures connectades entre elles i aleshores esdevenir les vies per les quals el radó pot continuar viatjant fins arribar a la superfície del sòl (a través dels bufadors) o fins a trobar una capa de sediments amb una certa porositat per on difondre's. Tot això explicaria el fet d'haver trobat nivells de radó més elevats en els recintes construïts sobre materials volcànics, especialment sobre les colades de lava, i més baixos en els recintes construïts sobre capes de sediments. Els dipòsits piroclàstics formats per gredes i altres fragments de mida superior són els que presenten porositats i permeabilitats més elevades i aleshores el radó pot viatjar amb molta facilitat a través d'aquests materials. Això també és consistent amb el fet d'haver trobat nivells elevats en els recintes construïts sobre dipòsits piroclàstics. Els dipòsits sedimentaris, en canvi, tenen unes permeabilitats més variables. Els lacustres, en estar formats per argiles i llims, presenten permeabilitats més baixes que els sediments al·luvials i col·luvials. Aleshores, com que el radó viatja amb més dificultat a través d'aquests materials i el seu contingut en radi no és elevat, els recintes construïts sobre aquest tipus de sòl haurien de tenir nivells baixos de radó. Aquest comportament és el que s'observa amb els resultats dels recintes sobre subsòl no volcànic (per exemple amb els recintes de La Vall d'en Bas), però el fet de tenir un subsòl volcànic sembla que produeix l'efecte contrari ja que a Olot s'han trobat nivells de radó més alts en els recintes construïts sobre sediments lacustres que en els al·luvials. Faria falta augmentar l'estadística de resultats per estudiar amb més detall la influència del tipus de sediments sobre els nivells de radó.

Variacions estacionals dels nivells de radó.

Amb els resultats dels recintes dels què es disposa de 4 mesures de la concentració de radó, amb períodes d'exposició de 3 o 4 mesos, s'han observat tres classes de variació estacional dels nivells de radó. Dels tres comportaments el que té més interès des del punt de vista de la geofísica és el corresponent al grup 1, pel qual la concentració de radó és més elevada durant els mesos càlids i disminueix durant els mesos freds. Durant els mesos freds de l'any, les precipitacions acostumen a ser més abundoses i això fa que en general el sòl estigui més humit. En aquesta situació el radó no viatja amb tanta facilitat com quan els porus del sòl estan lliures d'aigua i, aleshores, el radó que penetra a l'interior dels recintes procedeix del sòl que està directament en contacte amb el recinte. En canvi, durant els mesos càlids de l'any, principalment els mesos d'estiu que són els més secs, el sòl redueix bastant els seu contingut d'aigua. La permeabilitat i el coeficient efectiu de difusió depenen inversament del contingut d'aigua del sòl, per tant, quan el sòl s'asseca, aquests paràmetres augmenten i això afavoreix els dos possibles mecanismes de transport del radó en el sòl (la difusió i l'advecció). En aquestes zones estudiades també existeixen moltes fractures, com la falla d'Amer o altres de secundàries, i materials fissurats, com és el cas de les colades de lava, aleshores totes aquestes fractures poden quedar plenes d'aigua durant els mesos humits però quan arriba l'estació seca es

converteixen en autopistes per on el radó pot viatjar amb molta més facilitat. Per tant, el fet d'haver mesurat nivells de radó més elevats a l'estiu i més baixos durant els mesos freds de l'any, durant els quals la ventilació dels recintes tancats acostuma a disminuir, confirma la idea de que la major part del radó mesurat en els mesos càlids procedeix de zones molt allunyades. El fet de que el radó procedís directament del mantell terrestre, que en aquesta regió es troba a menys de 30 km de profunditat, seria consistent amb les hipòtesis de que la falla d'Amer és activa. Faria falta dur a terme un estudi més detallat, en el qual també es realitzessin mesures del contingut en radi en les aigües subterrànies i en totes els materials de la zona per acabar de confirmar que la font de radó és el mantell.

Influència de la falla d'Amer en els nivells de radó.

En general, els resultats obtinguts en els 4 pobles més pròxims a la falla d'Amer no mostren una influència clara de la falla en els nivells de radó a l'interior de recintes tancats. Només en el cas de La Vall d'en Bas s'observa aquesta possible influència, la qual és consistent amb tot el què s'ha comentat. Les dificultats que presentava l'observació d'aquesta influència han estat de dos tipus: les relacionades amb el disseny de la campanya de mesura i les relacionades amb la naturalesa de les zones estudiades. En primer lloc, es disposava d'una estadística de recintes molt petita en cadascun d'aquests municipis estudiats i no es podia controlar tot el conjunt de paràmetres que influeixen en els nivells de radó a l'interior d'un recinte tancat. En segon lloc, la posició exacte de la falla no es coneix amb molta precisió i els materials que recobreixen la falla al llarg del seu recorregut paral·lel a les zones estudiades tampoc són del mateix tipus, el què pot provocar que la influència de la falla sobre els nivells de radó no tingui la mateixa importància a tot arreu. Per exemple a les zones de Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles hi ha diferents capes alternades de materials volcànics i no volcànics. El fet d'haver mesurat el radó a l'interior de recintes tancats, on les diferents característiques estructurals del recinte i els hàbits dels seus ocupants també influeixen sobre els nivells de radó del seu interior, no permet observar fàcilment la possible influència de la falla.

Per continuar amb la caracterització dels nivells de radó en una zona volcànica i de falles s'ha iniciat una campanya de mesura de la concentració de radó directament en el sòl, on els nivells de radó són tres ordres de magnitud superiors, i amb la que s'intenta solucionar alguns dels inconvenients de la campanya de mesura als recintes tancats. S'ha escollit estudiar la zona d'Amer, per tractar-se del municipi on la falla passa pel centre de la vall i que està totalment recoberta per sediments del Quaternari. Al llarg de 5 línies perpendiculars a la trajectòria de la falla s'han instal·lat un total de 27 detectors (3 d'actius, que mesuren en continu les fluctuacions de la concentració de radó en el sòl i 24 de passius, amb períodes d'exposició entre 3 i 5 setmanes). Actualment encara s'estan portant a terme les mesures però els primers resultats ja indiquen una influència clara de la falla en els nivells de radó en el sòl. Aquests resultats són consistents amb la hipòtesis de que la falla és activa i de que la degasificació del mantell i el transport del radó a través de les falles siguin les causes dels nivells elevats de radó en alguns recintes estudiats d'Olot.

Conclusions.

Les conclusions d'aquest treball es presenten separades en dos grups: les relacionades amb el mètode experimental i les pròpies de la campanya de mesura realitzada.

Mètode experimental:

1. S'ha realitzat un control de qualitat dels sistemes de revelatge, lectura i anàlisi dels detectors de Makrofol per comprovar la reproductibilitat dels resultats obtinguts. La resposta d'un conjunt de detectors irradiats, revelats, llegits i analitzats en les mateixes condicions és la mateixa, independentment de la posició ocupada en el sistema de cel·les. Aquesta resposta tampoc varia quan la única diferència entre els revelatges és la utilització de dissolucions preparades independentment. Per tant, es comprova que la metodologia utilitzada per la preparació de les dissolucions i, en general, per tot el procés de revelatge, lectura i anàlisi dels detectors de Makrofol és adequada.
2. S'ha obtingut que la velocitat d'atac superficial produïda per l'agent revelador durant el revelatge electroquímic dels detectors de 500 μm és de $(3.6 \pm 0.2) \mu\text{m h}^{-1}$. Aquest resultat posa de manifest que ni el canvi de gruix del detector ni la modificació en el valor de la intensitat del camp elèctric aplicat influeixen sobre la velocitat d'atac superficial del detector.
3. S'ha realitzat una optimització de les condicions de lectura dels detectors a partir de l'anàlisi de les imatges capturades per la foto vídeo càmera:
 - S'ha determinat l'interval de nivells de gris de les traces, [130-170], pel qual el nombre de traces mesurat és independent del nivell de gris escollit i, per no haver de repetir aquest anàlisi cada vegada que es fa una lectura, s'han guardat en un fitxer les dues imatges del detector corresponents als dos extrems d'aquest interval.
 - Aleshores, el mètode utilitzat per reproduir les millors condicions de lectura de forma ràpida i segura consisteix en ajustar manualment la intensitat de llum que arriba al detector comparant visualment la seva imatge amb les dues imatges guardades.
4. S'ha determinat la densitat de traces de fons dels detectors de Makrofol en diferents moments al llarg de la campanya de mesura i s'ha comprovat que no s'ha produït cap increment significatiu del seu valor, $(8.3 \pm 0.5) \text{ tr cm}^{-2}$. També s'ha determinat la densitat de traces d'un conjunt de detectors de trànsit i s'ha comprovat que coincideix amb la dels detectors de fons, dins el rang d'incertesa. Això posa de manifest que el fet de guardar els detectors a l'interior de la nevera i dins de les bosses de polietilè Magic Vac, a les que s'hi fa el buit, permet evitar l'augment del nombre de traces de fons, i també que el fet de preparar els dosímetres just abans de la seva distribució i guardar-los amb les mateixes bosses de fer el buit és una bona metodologia per evitar les traces de trànsit.

5. Per unes exposicions típiques d'entre 3 i 4 mesos la concentració de radó mínima detectable amb els detectors de Makrofol correspon al rang $[8 - 11] \text{ Bq m}^{-3}$. Si la concentració de radó mitja durant aquest període d'exposició té un valor de 55 Bq m^{-3} , la densitat de traces obtinguda és de l'ordre de 100 tr cm^{-2} i la seva incertesa teòrica és de l'ordre del 10 %.
6. S'ha determinat la incertesa sistemàtica associada al mètode de mesura dels detectors de Makrofol i s'ha obtingut un valor del 5.9 %.
7. El factor de calibratge dels detectors de Makrofol obtingut amb tres grups de detectors sotmesos a tres exposicions diferents a la cambra de radó del NRPB és:

$$\varepsilon = (0.68 \pm 0.03) \text{ tr cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$$

La diferència respecte el factor obtingut anteriorment, $(0.76 \pm 0.02) \text{ tr cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$, és deguda a l'adquisició de nous lots de Makrofol i a la disminució de la intensitat del camp elèctric aplicat en el revelatge electroquímic.

8. Amb la participació a la intercomparació al NRPB (2005) es confirma el valor obtingut en el calibratge, però es comprova que:
 - El factor de calibratge només és vàlid mentre la resposta del detector té un comportament lineal, és a dir, quan la densitat de traces en funció de l'exposició es pot ajustar a una recta ($\rho < 560 \text{ tr cm}^{-2}$).
 - L'expressió que permet obtenir el valor de l'exposició quan la densitat de traces és superiors a 560 tr cm^{-2} és:

$$\chi_{Rn} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{\rho \cdot b}{\varepsilon} \right)$$

i el valor obtingut pel paràmetre b és $(2442 \pm 2) \cdot 10^{-7} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$.

9. Amb la participació a la intercomparació de sistemes de mesura integradors de la concentració de radó a l'INTE s'ha observat que el factor de calibratge dels dosímetres de Makrofol presenta petites variacions sota diferents condicions ambientals i que tendeix a disminuir el seu valor a mesura que augmenta la temperatura. Per temperatures entre els 10 i 30 °C i humitats relatives entre el 30 i el 80 % s'haurien d'aplicar uns factors correctors que varien dins el rang $[1.02 - 1.23]$.
10. S'ha observat que el dosímetre de Makrofol amb un filtre de polietilè té la mateixa resposta que el dosímetre amb filtre de fibra de vidre en atmosferes pures de radó i en ambients amb temperatures entre 10 i 30 °C i humitats entre el 30 i el 80 %

11. Amb la intercomparació de sistemes de mesura en continu de la concentració de radó de l'INTE s'ha observat que:

- El monitor de radó PRASSI no es veu afectat per les condicions de temperatura i humitat, amb valors entre 10-30 °C i 30-80 %, respectivament.
- S'ha d'aplicar un factor corrector de 0.87 ± 0.01 sobre totes les concentracions de radó mesurades per aquest monitor.
- Com que el PRASSI no discrimina el radó del toró es produeix una influència del 40 % de la concentració de toró present en el recinte sobre les mesures de radó.

La campanya de mesura de la concentració de radó a la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

12. Els valors de la concentració de radó obtinguts en els recintes mesurats a la campanya preliminar d'Olot, en general, coincideixen amb els obtinguts en aquesta campanya de mesura, llevat de dues excepcions on la diferència és significativa.

13. Dels 5 municipis estudiats, a Olot és on s'han trobat els recintes amb nivells de radó més elevats.

14. La majoria dels recintes estudiats tenen unes concentracions de radó molt inferiors als nivells d'acció recomanats pels organismes europeus i internacionals encarregats de la protecció radiològica.

- Només hi ha dos llocs de treball amb unes concentracions de radó superiors als 500 Bq m^{-3} i no n'hi ha cap que superi els 1500 Bq m^{-3} , valors que determinen el rang pels nivells d'acció en llocs de treball recomanat per la ICRP.
- Hi ha cinc habitatges que superen els 200 Bq m^{-3} , que és el nivell d'acció pels habitatges de nova construcció recomanat per la CEC, tres dels qual superen els 400 Bq m^{-3} , que és el nivell d'acció pels habitatges antics, recomanat per la mateixa CEC. Els tres dels habitatges que presenten nivells més elevats són cases antigues i els dosímetres es van col·locar en dependències on els habitants no hi passen gaire temps, per tant, els nivells de radó existents no representen un risc radiològic significatiu per aquestes persones. En un habitatge que presenta un nivell de radó superior als 200 Bq m^{-3} el dosímetre es va col·locar al menjador però, en ser també una casa antiga i no superar els 400 Bq m^{-3} , no és necessari realitzar-hi cap tipus d'actuació especial des del punt de vista de la protecció radiològica.

15. Com que tots els recintes estudiats, llevat d'una excepció, estan situats en soterranis (18 %) i plantes baixes (82%) i, en general, els nivells de radó no són molt elevats es pot concloure que la població d'aquests municipis no està sotmesa a un risc radiològic significatiu.

16. S'ha trobat que els llocs de treball estudiats presenten un rang i uns valors mitjos de la concentració de radó més baixos que en el cas dels habitatges estudiats. La mitja geomètrica pels llocs de treball és $(60 \pm 2) \text{ Bq m}^{-3}$, mentre que la dels habitatges és $(72 \pm 3) \text{ Bq m}^{-3}$.

17. S'ha comprovat que la principal font de radó en aquests recintes estudiats és el sòl sobre el que estan construïts. La mitja geomètrica dels soterranis és gairebé el doble que la de les plantes baixes (57 ± 2) Bq m⁻³.
18. En el recinte amb el codi 42, on s'ha obtingut un valor mig anual de la concentració de radó de (198 ± 11) Bq m⁻³, s'ha comprovat que:
- La concentració de radó presenta fluctuacions diàries entre 150 i 400 Bq m⁻³.
 - La ventilació té un efecte molt important sobre els nivells de radó, ja que quan s'obre una finestra del recinte durant una hora, el nivell de radó disminueix fins a valors inferiors als 100 Bq m⁻³ i tarda unes tres o quatre hores per assolir el nivell de radó inicial.
19. En el recinte amb el codi 8, corresponent al lloc de treball on s'ha obtingut el valor mig anual de la concentració de radó més elevada, (732 ± 36) Bq m⁻³, s'ha comprovat que:
- De dilluns a divendres, la concentració de radó assoleix els valors màxims, entre 1000 i 1400 Bq m⁻³, al llarg de les primeres hores del dia. A la tarda, quan entren a treballar, la concentració de radó disminueix ràpidament fins a valors inferiors a 100 Bq m⁻³.
 - Durant el cap de setmana i les primeres hores del dilluns, la concentració de radó pot arribar als 2000 Bq m⁻³.
 - El valor mig de la concentració de radó durant les hores laborables és de 358 Bq m⁻³ amb una desviació estàndard de 200 Bq m⁻³, per tant, la ventilació provocada per l'obertura de la porta del recinte durant les hores laborables, és suficient per reduir els nivells de radó de forma important.
 - Aquest és un exemple clar de lloc de treball on la concentració de radó mesurada durant un llarg període d'exposició amb un dosímetre passiu és molt més elevada que la concentració de radó a que estan sotmesos realment els treballadors d'aquest recinte.
20. De l'estudi dels nivells de radó en funció del tipus de material del sòl i el subsòl es desprèn que, en general, els recintes construïts sobre subsòl volcànics presenten uns nivells de radó més elevats que en el cas dels que tenen un subsòl no volcànic, tal i com es va comprovar a la campanya preliminar d'Olot.
21. De l'estudi de la influència de la falla d'Amer sobre els nivells de radó dels recintes estudiats dels municipis de la Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols, les Planes d'Hostoles i Amer, només s'observa una possible influència de la falla amb els resultats de La Vall d'en Bas. En aquest cas, la concentració de radó és major pels recintes més pròxims a la falla i disminueix a mesura que la distància augmenta.
22. De l'estudi de les variacions estacionals de la concentració de radó en els 53 recintes on s'han realitzat 4 mesures amb període d'exposició de tres o quatre mesos es comprova que, en promig, la concentració de radó és més elevada durant els dos primers períodes, corresponents els mesos

més càlids de l'any. Aquest comportament és diferent del que s'ha observat en altres campanyes de mesura.

23. Els 53 recintes estudiats s'han classificat en tres grups segons el tipus de variació estacional i s'ha trobat que:
- i. La majoria dels recintes que presenten unes concentracions de radó més elevades a l'estiu estan construïts sobre materials volcànics.
 - ii. Diferenciant entre els dos tipus de materials volcànics, piroclastos i colades de lava, s'ha comprovat que els recintes construïts sobre les colades de lava són els que presenten una variació més important.
 - iii. Els recintes construïts sobre una capa de sediments lacustres amb un subsòl volcànic presenten una variació de la concentració de radó oposada als que estan directament sobre materials volcànics, presentant el nivell màxim de radó durant els mesos freds de l'any.
24. Aquests resultats són consistents amb la hipòtesis de que el radó prové de grans distàncies a través de materials amb alta porositat i permeabilitat, ja que els materials volcànics no són especialment rics en radi. Durant els mesos freds de l'any, en que el sòl acostuma a estar més humit, el radó no viatja amb tanta facilitat a través de sòls porosos o fracturats, com els piroclastos i les colades de lava, i aleshores els nivells de radó a l'interior de recintes tancats són baixos. En canvi, durant els mesos càlids i secs el contingut d'aigua del terreny és menor i el transport del radó es veu afavorit. Això fa que el radó procedent de grans distàncies pugui viatjar a través de les falles i fissures del subsòl i arribar amb més facilitat a l'interior d'aquests recintes.

Perspectives de treball futur.

Des del punt de vista de la protecció radiològica i d'acord amb el reglament de protecció sanitària contra les radiacions ionitzants s'ha de continuar localitzant llocs de treball que puguin tenir nivells elevats de radó. Queda pendent realitzar mesures de la concentració de radó a l'interior de balnearis i altres llocs de treball que utilitzen directament aigües subterrànies, les quals poden tenir elevats continguts en radi i radó i ser les responsables d'unes concentracions elevades dels descendents de vida mitja curta del radó a l'interior d'aquests recintes. També es poden realitzar mesures en zones granítiques, que acostumen a ser més riques en radi, i en zones amb sòls fracturats que facilitin el transport del radó des d'altres zones.

S'han d'iniciar i/o continuar els estudis detallats en els llocs de treball identificats amb concentracions més elevades. En els dos llocs de treball d'Olot dels que es disposa d'una mesura en continu de la concentració de radó i dels paràmetres meteorològics es pot aplicar el model RAGENA i veure si els resultats predits coincideixen amb els experimentals. Es pot desenvolupar un model anàleg al RAGENA, però aplicable als llocs de treball que no tenen les mateixes característiques d'un edifici, com són les coves i mines subterrànies, per predir el comportament del radó en el seu interior.

Les zones volcàniques de La Garrotxa i la falla d'Amer presenten unes característiques geològiques que confereixen un especial interès a l'estudi i modelització de la dinàmica del radó. La influència dels materials volcànics i les falles en els nivells de radó pot ajudar a una millor comprensió i caracterització dels processos dinàmics del subsòl a la zona i obra noves perspectives d'estudi d'àmbit geològic, ja que s'ha comprovat que el radó es pot utilitzar com a traçador de processos ambientals i fenòmens geològics.

L'estudi de la influència de la falla d'Amer sobre els nivells de radó a l'interior de recintes tancats no permet observar que el radó procedeix de la desgasificació del mantell terrestre i que les diferents falles i fractures del terreny són les vies a través de les quals el radó pot viatjar fins arriba a la superfície del sòl i difondre's a l'atmosfera o penetrar a l'interior d'aquests recintes. Els primers resultats de la campanya de mesura de la concentració de radó directament en el sòl d'Amer estan més d'acord amb aquesta possibilitat, però falta veure què indiquen els resultats finals. De totes formes, seria necessari realitzar un estudi més detallat de tota la zona, especialment a la zona de la Vall d'en Bas, que és on s'ha trobat una possible influència de la falla en els nivells de radó en els recintes estudiats, i també a Olot que és on s'han trobat els nivells de radó més elevats. En aquest estudi caldria realitzar:

1. Mesures de la concentració de radó a l'interior de recintes tancats amb interès geològic (recintes amb bufadors).
2. Mesures en els diferents tipus de sòls volcànics i no volcànics, per estudiar detalladament les variacions de la concentració de radó directament en el sòl, sense la influència de tots els paràmetres que intervenen a l'interior d'un recinte. Aquestes mesures s'haurien de realitzar en zones on l'acció de l'home hagi estat mínima, per no trobar sòls molt manipulats que puguin alterar els resultats obtinguts. Una altra possibilitat és la realització de mesures en zones on

pràcticament no hi hagi capa de sediments recobrint la falla, o en tot cas que aquesta capa sigui molt homogènia i no gaire gruixuda, perquè el transport del radó des de la falla fins als punts de mesura a través d'aquests sediments no es vegi influenciat per gaires factors.

3. Mesures del contingut d'urani i radi en els diferents tipus de sòl i en les aigües subterrànies dels voltants de la zona estudiada per identificar les possibles fonts de radó alternatives a la falla.
4. Mesures de paràmetres geològics, com la porositat i la permeabilitat del terreny, per poder estudiar el transport del gas radó a través dels diferents materials.
5. Mesures dels paràmetres meteorològics, tal com la pressió atmosfèrica, la temperatura i la humitat relativa, per estudiar les correlacions d'aquests paràmetres amb les variacions de la concentració de radó.

Paral·lelament a tot aquest estudi, es podria desenvolupar un model del transport del radó en el subsòl d'aquesta zona estudiada que es pogués aplicar a altres zones volcàniques i de falles.

Annex A: Unitats i quantitats especials.

ICRP PUBLICATION 65: Protection Against Radon-222 at Home and at Work (ICRP 1993).

PROTECTION AGAINST RADON-222

3

Table 1. Decay properties of radon-222 and short lived progeny

Radionuclide	Half-life	Main radiation energies and yields (y)					
		Alpha		Beta		Gamma	
		Energy (MeV)	y (%)	Energy (max) (MeV)	y (%)	Energy (MeV)	y (%)
²²² Rn	3.824 days	5.49	100	—	—	—	—
²¹⁸ Po	3.05 min	6.00	100	—	—	—	—
²¹⁴ Pb	26.8 min	—	—	1.02	6	0.35	37
				0.70	42	0.30	19
				0.65	48	0.24	8
²¹⁴ Bi	19.9 min	—	—	3.27	18	0.61	46
				1.54	18	1.77	16
				1.51	18	1.12	15
²¹⁴ Po	164 μ s	7.69	100	—	—	—	—

Sources: Browne and Firestone (1986) and ICRP (1983).

1.4. Special Quantities and Units

(14) This section sets out the special quantities and units that are used to characterise the concentration of the short-lived progeny of radon in air, and the resulting inhalation exposure.

Potential alpha energy

(15) The potential alpha energy, ϵ_p , of an atom in the decay chain of radon is the total alpha energy emitted during the decay of this atom to stable ²¹⁰Pb. The potential alpha energy per unit of activity (Bq) of the considered radionuclide is $\epsilon_p/\lambda_r = (\epsilon_p t_r / \ln 2)$ where λ_r is the decay constant and t_r the radioactive half-life of this nuclide. Values of ϵ_p and ϵ_p/λ_r are listed in Table 2.

Table 2. Potential alpha energy per atom and per unit activity

Radionuclide	Half-life	Potential alpha energy			
		Per atom		Per unit of activity	
		(MeV)	(10 ⁻¹² J)	(MeV Bq ⁻¹)	(10 ⁻¹⁰ J Bq ⁻¹)
Radon (²²² Rn) progeny:					
²¹⁸ Po	3.05 min	13.69	2.19	3615	5.79
²¹⁴ Pb	26.8 min	7.69	1.23	17 840	28.6
²¹⁴ Bi	19.9 min	7.69	1.23	13 250	21.2
²¹⁴ Po	164 μs	7.69	1.23	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁶
Total (at equilibrium), per Bq of radon				34 710	55.6

Concentration in air

(16) The potential alpha energy concentration, c_p , of any mixture of short-lived radon progeny in air is the sum of the potential alpha energy of these atoms present per

unit volume of air. Thus, if c_i is the activity concentration of a decay product nuclide i , the potential alpha energy concentration of the progeny mixture is

$$c_p = \sum_i c_i (e_{pi}/\lambda_{ti})$$

This quantity is expressed in the SI unit J m^{-3} ($1 \text{ J m}^{-3} = 6.242 \times 10^{12} \text{ MeV m}^{-3}$).

(17) The potential alpha energy concentration of any mixture of radon progeny in air can be also expressed in terms of the so-called equilibrium equivalent concentration, c_{eq} , of their parent nuclide, radon. The equilibrium equivalent concentration, corresponding to a non-equilibrium mixture of radon progeny in air, is the activity concentration of radon in radioactive equilibrium with its short-lived progeny that has the same potential alpha energy concentration, c_p , as the actual non-equilibrium mixture. The SI unit of the equilibrium equivalent concentration is Bq m^{-3} .

(18) The equilibrium factor, F , is defined as the ratio of the equilibrium equivalent concentration to the activity concentration of the parent nuclide, radon, in air. This factor characterises the disequilibrium between the mixture of the short-lived progeny and their parent nuclide in air in terms of potential alpha energy.

Inhalation exposure of individuals

(19) The quantity "exposure," P , of an individual to radon progeny is defined as the time integral of the potential alpha energy concentration in air, c_p , or the corresponding equilibrium equivalent concentration, c_{eq} , of radon to which the individual is exposed over a given period T , e.g. one year.

$$\text{Potential } \alpha \text{ energy exposure} \quad P_p(T) = \int_0^T c_p(t) dt$$

$$\text{Equilibrium equivalent exposure} \quad P_{eq}(T) = \int_0^T c_{eq}(t) dt$$

(20) The unit of the exposure quantity P_p is J h m^{-3} ; for the exposure quantity P_{eq} the unit is Bq h m^{-3} . The potential alpha energy exposure, P_p , of workers is often expressed in the historical unit Working Level Month (WLM). 1 WLM was originally defined as the concentration of potential alpha energy associated with the radon progeny in equilibrium with 100 pCi ℓ^{-1} (3700 Bq ℓ^{-1}). This concentration was about $1.3 \times 10^5 \text{ MeV } \ell^{-1}$, but the precise value depended on the estimates of alpha energy per disintegration. The Working Level is now defined as a concentration of potential alpha energy of $1.300 \times 10^5 \text{ MeV m}^{-3}$. Since the quantity was introduced for specifying occupational exposure, 1 month was taken to be 170 hours. Since $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$, the relationship between the historical and the SI units is as follows:

$$\begin{aligned} 1 \text{ WLM} &= 3.54 \text{ MJ h m}^{-3} \\ 1 \text{ MJ h m}^{-3} &= 0.282 \text{ WLM} \end{aligned}$$

(21) Here, and elsewhere in this report, values that will be used in later calculations may be given to more significant figures than are usually needed and sometimes to more than the precision of the data justifies. Whenever rounded values are given for quantities that will be used in subsequent calculations, the unrounded values are retained for use in these calculations. Most values are given in SI units. However, the

historical units are still widely used and converted values are also given where it is likely that this will be helpful.

(22) The conversion coefficients between the concentration quantities, potential alpha energy, C_p , and equilibrium equivalent concentration, C_{eq} ; and between the exposure quantities, potential alpha energy exposure, P_p , and equilibrium equivalent exposure, P_{eq} , are given in Table 3.

Table 3. Conversion coefficients for the different concentration quantities and for the corresponding exposure quantities for radon-222

Quotient	Conversion coefficients
C_p/C_{eq}	$5.56 \times 10^{-9} (\text{J m}^{-3}) \text{ per } (\text{Bq m}^{-3})$
C_{eq}/C_p	$1.80 \times 10^8 (\text{Bq m}^{-3}) \text{ per } (\text{J m}^{-3})$
P_p/P_{eq}	$5.56 \times 10^{-9} (\text{J h m}^{-3}) \text{ per } (\text{Bq h m}^{-3})$
P_{eq}/P_p	$1.57 \times 10^8 \text{ WLM per } (\text{Bq h m}^{-3})$
	$1.80 \times 10^8 (\text{Bq h m}^{-3}) \text{ per } (\text{J h m}^{-3})$
	$6.37 \times 10^5 (\text{Bq h m}^{-3}) \text{ per WLM}$

Quantities: C_p —concentration of potential alpha energy, C_{eq} —equilibrium equivalent concentration of radon, P_p —time-integrated exposure to potential alpha energy concentration, P_{eq} —time-integrated exposure to equilibrium concentration of radon.

(23) The relationship between the annual exposure and the radon concentration at home or at work can be obtained from Table 3. For most purposes, it is adequate to use an equilibrium factor of 0.4 and an occupancy of 2000 hours per year at work or 7000 hours indoors (UNSCEAR, 1988). On this basis, a continued exposure to a radon concentration of 1 Bq m^{-3} results in an annual exposure at home of $1.56 \times 10^{-2} \text{ MJ h m}^{-3}$ ($4.40 \times 10^{-3} \text{ WLM}$). The corresponding figure at work is $4.45 \times 10^{-3} \text{ MJ h m}^{-3}$ ($1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}$).


1.5. The Principles of Protection

(24) In *ICRP Publication 60*, attention is drawn to the need for protection against natural sources of radiation both in dwellings and workplaces. Key extracts from the recommendations as they relate to radon are presented here.

(25) The Commission distinguishes between two circumstances of exposure to radiation, one where human activities introduce new sources or modes of exposure and thus increase the overall exposure and the other where they decrease the exposure to existing sources. The first it calls practices and the second intervention. It also identifies the circumstances under which exposure to radon at work may need to be subject to the Commission's system of protection for practices and where the need for action against exposure to radon in homes should be considered. Radon occurs in all buildings and the concentrations vary widely from building to building. In the workplace, there is sometimes a difficulty in making a sharp distinction between radon concentrations that should be treated as being due to a practice or as due to an existing situation for which

Annex B: Resultats de les intercomparacions.

Taula B.1. Resultats del factor de correcció pels diferents monitors i exposicions a la cambra de radó (Vargas et al., 2005a).



CONSEJO DE
SEGURIDAD NUCLEAR

CSN

Institut de Tècniques Energètiques

Avda Diagonal 647, edifici ETSEIB

08028 Barcelona

Tel. 934016692 Fax. 934017149

Doc. CSN TORON 05

Intercomparación de sistemas de
medida en continuo de la concentración
de radón

Feb. 2005

Pág. 9 de
10

Exposición	Equipo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.96 ± 0.11	0.98 ± 0.11	1.17 ± 0.13	0.86 ± 0.10	0.95 ± 0.11	1.27 ± 0.16	0.98 ± 0.11	1.36 ± 0.19	1.00 ± 0.11
2 y 2P	0.94 ± 0.11	0.93 ± 0.11	1.21 ± 0.13	0.88 ± 0.10	0.90 ± 0.10	1.19 ± 0.15	0.93 ± 0.11	1.81 ± 0.25	0.99 ± 0.11
3 y 3P	0.93 ± 0.11	0.94 ± 0.11	1.20 ± 0.14	0.88 ± 0.11	0.93 ± 0.11	1.15 ± 0.14	0.94 ± 0.11	1.84 ± 0.24	0.97 ± 0.11
4	0.99 ± 0.11	1.00 ± 0.12	1.15 ± 0.13	0.88 ± 0.10	0.98 ± 0.11	1.65 ± 0.21	0.99 ± 0.11	1.01 ± 0.14	1.00 ± 0.11
5 y 5P	0.98 ± 0.12	0.99 ± 0.11	1.17 ± 0.13	0.86 ± 0.11	0.97 ± 0.12	2.53 ± 0.34	0.98 ± 0.12	1.13 ± 0.16	0.98 ± 0.12
6	0.95 ± 0.10	0.95 ± 0.10	1.16 ± 0.13	0.87 ± 0.10	0.93 ± 0.10	1.35 ± 0.15	1.01 ± 0.10	1.34 ± 0.10	0.98 ± 0.11
7	1.01 ± 0.11	1.01 ± 0.11	1.17 ± 0.12	0.89 ± 0.10	0.97 ± 0.10	1.59 ± 0.23	0.98 ± 0.10	1.60 ± 0.29	1.07 ± 0.11

Taula B.2. Resultats de la intercomparació de detectors passius de radó de l'NRPB. Full de resultats enviat pel Dr. Chris Howarth.

	Actual exposure	$\pm 5\%$	Detector number	Result (kBq h m ⁻³)		Standard deviation	Mean - Transit	% Standard deviation
				Mean				
Transits			16	17	8,1	6,4		
			17	3				
			18	0				
			19	11				
			20	17				
			36	8				
			37	11				
			38	0				
			39	3				
			40	11				
Exposure 1	150	8	2	185	186,2	21,8	178,1	12,2
			5	216				
			8	177				
			10	174				
			15	222				
			21	146				
			24	177				
			26	182				
			31	199				
			32	185				
Exposure 2	1745	87	1	1374	1430,7	47,6	1422,5	3,3
			4	1369				
			6	1456				
			13	1405				
			14	1388				
			23	1442				
			27	1433				
			29	1436				
			30	1506				
			34	1498				
Exposure 3	278	14	3	334	317,5	37,0	309,4	11,9
			7	264				
			9	306				
			11	323				
			12	353				
			22	309				
			25	278				
			28	390				
			33	292				
			35	328				

Taula B.3. Resultats de la intercomparació de sistemes de mesura integradors de la concentració de radó de l'INTE (Vargas et al., 2005b). S'han proporcionat els valors dels factors de correcció que s'han d'aplicar als factors de calibratge dels detectors sotmesos a cadascuna de les exposicions. El GFR té el codi de laboratori número 4.

Codi lab.	Identificació de l'exposició					
	1 (20 °C 45 %)	2 (20 °C 30 %)	3 (10 °C 45 %)	4 (30 °C 45 %)	5 (20 °C 80 %)	6 (30 °C 80 %)
1	0.89	0.79	0.96	0.90	1.02	1.03
3	0.93	0.98	0.94	0.97	0.95	1.13
4	1.12	1.02	1.04	1.19	1.09	1.23
5	0.98	0.83	0.77	1.55	0.97	1.79
6	1.00	1.07	1.10	1.15	1.23	1.20
7	0.70	(1)	(1)	(1)	1.04	(1)
8	0.97	0.94	0.75	1.32	(2)	(2)
9	1.72	2.03 ⁽³⁾	1.64	1.68	1.67	1.68
10	0.92	0.87	0.74	1.22	0.86 ⁽²⁾	1.51 ⁽²⁾
11	1.01	0.98	0.98	1.03	1.02	1.02
12	1.41	1.47	1.50	1.66	1.95	2.37
13	0.86	0.88	0.83	0.92	0.95	1.01

⁽¹⁾ El laboratori 7 només va participar a les exposicions 1 i 5.

⁽²⁾ Els laboratoris 8 i 10 van indicar que, degut a les característiques de les exposicions 5 i 6, els seus detectors estaven fora del rang de funcionament correcte. El laboratori 10 realitza una extrapolació per obtenir els valors de l'exposició.

⁽³⁾ Per motius propis al Laboratori d'Estudis del Radó (LER) de l'INTE només es va poder exposar un detector d'aquest laboratori a l'exposició indicada amb el número 2.

Annex C: Models de cartes entregades als col·laboradors.



Universitat Autònoma de Barcelona

Departament de Física

Grup de Física de les Radiacions

Mesura de la concentració de radó en recintes tancats d'Olot

FULL INFORMATIU

Benvolgut/da col·laborador/a:

El radó és un gas radioactiu d'origen natural que no es pot detectar amb els sentits humans. Es produeix en la desintegració de l'urani, que és un mineral que està present, en menor o major grau, en tot tipus de sòl i de materials de construcció. Bàsicament, el radó es forma en el subsòl, per on viatja fins a arribar a l'aire exterior, on es difon ràpidament. En penetrar en les cases, però, es pot concentrar fins a arribar a nivells que poden ser perjudicials per a la salut. Això esdevé especialment en les vivendes unifamiliars poc ventilades i amb un bon aïllament tèrmic.

En els darrers 20 anys ha esdevingut un interès creixent dels científics en el camp del radó i de les seves conseqüències en la salut pública; fins al punt que importants congressos internacionals tracten gairebé exclusivament d'aquest tema. També a la nostra premsa local han aparegut diversos articles parlant del radó. El Grup de Física de les Radiacions del Departament de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona porta uns 12 anys fent recerca en aquest camp, i ha dut a terme diferents campanyes de mesura d'aquest gas en vivendes catalanes. El moviment d'aquest gas en el subsòl depèn molt de les característiques físiques del subsòl i de les condicions climatològiques de cada zona en concret. En aquest sentit, la zona volcànica d'Olot presenta unes característiques úniques a Catalunya que han motivat al nostre grup a dur a terme un estudi dels nivells de radó en els recintes tancats d'Olot i també a caracteritzar el sòl d'origen volcànic des del punt de vista del radó. En el marc d'aquest estudi, necessitem la col·laboració de persones i institucions que permetin la instal·lació de dosímetres en diferents recintes tancats.

El dosímetre de radó consisteix en una combinació de 4 detectors plàstics circulars recoberts d'alumini instal·lats en dues petites cambres de difusió enganxades. No es tracta pas doncs, de cap element radioactiu, sino d'un plàstic que permet detectar la radiació emesa per aquest gas, ja que amb els nostres sentits no podem. El dosímetre ha d'estar penjat de qualsevol punt de l'habitació on no hi toqui el sol directament. Un cop instal·lat, no s'ha de tocar ni canviar de lloc durant un període d'uns 3-4 mesos, al final del qual el recollirem. La combinació de 4 detectors de radó ens permetrà d'estimar amb una bona precisió quina és la dosi de radiació que poden rebre les persones que habitualment estiguin en el recinte tancat. Naturalment, un cop tinguem els resultats definitius, us informarem dels nivells de radó obtinguts i de les seves implicacions pel què fa a la protecció radiològica.

Per tal de poder interpretar correctament els resultats que obtinguem, haurem de recollir informació respecte de l'emplaçament del dosímetre i de l'edifici on s'ha instal·lat. Tanmateix, li agrairiem que davant qualsevol incidència que esdevingués pel què fa als dosímetres, es posés immediatament en contacte amb nosaltres. Li agrairim molt la seva col·laboració i restem a la seva disposició per a qualsevol dubte i/o suggeriment. Els nostres noms i telèfons són:

Dr. Lluís Font	93 581 29 35
Dra. Carme Baixeras	93 581 15 08
Dr. Joan Bach	93 581 12 72
Vicky Moreno	93 581 13 64

Atentament,

Dr. Lluís Font



Universitat Autònoma de Barcelona

Departament de Física

Grup de Física de les Radiacions

Bellaterra, 15 de setembre de 2005

Benvolgut/da col·laborador/a:

Un cop finalitzada la campanya de mesura del gas Radó que s'ha dut a terme a diferents habitatges i llocs de treball de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer i d'acord amb el compromís que vàrem adquirir, li comuniquem els resultats definitius de la concentració de Radó, obtinguts a casa seva a partir dels diferents dosímetres que varen estar exposats durant el període de mesura: abril 2004 – juny 2005:

Codi del dosímetre	Emplaçament	Concentració de Radó (Bq/m ³)
X	Planta baixa.	32 ± 4

Aquest valor de la concentració de gas radó correspon al valor mig anual i no és un valor preocupant. Amb la mesura realitzada el primer trimestre ja vàrem observar un nivell baix de radó i els nous resultats confirmen que es tracta d'un valor petit, la qual cosa és beneficiosa per la seva salut. Perquè es faci una idea, la Comissió Internacional de Protecció Radiològica (ICRP) suggereix que en els habitatges antics una concentració de radó de 400 Bq/m³ hauria de considerar-se un nivell d'acció a partir del qual caldria prendre mesures de protecció. Però com que el nivell que hem mesurat és molt inferior a aquest valor, no cal realitzar cap tipus d'actuació especial. Només recordar-li que la ventilació de qualsevol recinte tancat sempre és una mesura que millora la qualitat de l'aire que respiren les persones del seu interior, com a mínim des del punt de vista del gas Radó.

Li agraïm novament la seva col·laboració en aquest estudi i si té qualsevol dubte o suggeriment no dubti en posar-se en contacte amb nosaltres. Els nostres telèfons són:

Carmen Baixeras: 93 581 1508
Joan Bach: 93 581 1272
Lluís Font: 93 581 2935
Vicky Moreno: 93 581 1364

Atentament,

Carmen Baixeras

Annex D: Taules de la campanya de mesura.

Taula D.1. Les principals característiques dels recintes estudiats, ordenats pel seu codi numèric.

Codi	Poble	Tipus recinte	Propietat	Emplaçament	Nivell	Mida	Obertures	Ventilació	Materials de construcció i revestiment	Any de construcció	Distància a la falla (m)
1	Olot	Lloc de treball	Privat	Botiga	soterrani	Gran	1P	Baixa	3, 5, 9, 10	1905	>5000
2	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala exposicions	planta baixa	Gran	1 P, 3 F	Baixa	4, 5, 9, 10	1770	>5000
3	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	primera planta	Mitjà	2 P, 2 F	Alta	6, 10	1988	>5000
4	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	semi-soterrani	Petit	1 P, 1F	Baixa	1, 5, 6, 9, 10, 12	1986	>5000
5	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Gran	2 P, 1 F	Normal	4, 5, 9, 10	1850-1870	>5000
6	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	1 P, 6 F	Normal	1, 6, 9, 10	1980	>5000
7	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala exposicions	planta baixa	Gran	1 P, 10 F	Baixa	3, 5, 9, 10	1854	>5000
8	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 3 F	Baixa	1, 5, 9, 10, 14	1950-1960	>5000
13	Planes d'H.	Lloc de treball	Públic	Magatzem	soterrani	Mitjà	1 P, 2 F	Normal	3, 5, 9, 10	1940	1044 ± 27
14	Planes d'H.	Lloc de treball	Públic	Sala d'estar	planta baixa	Gran	4 P, 4 F	Alta	3, 5, 9, 10	1900	1209 ± 27
15	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	3, 5, 9, 10	1800-1900	714 ± 27
16	Olot	Lloc de treball	Privat	Despatx	soterrani	Petit	1P	Baixa	1, 5	2002	>5000
17	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala de lectura	soterrani	Gran	3P,1 F	Alta	6, 9, 10	1996	>5000
18	Olot	Lloc de treball	Públic	Oficina	planta baixa	Mitjà	2P	Normal	4, 7, 9, 10	1700-1750	>5000
19	Olot	Lloc de treball	Públic	Arxiu	soterrani	Mitjà	1P	Baixa	6, 8	1988	>5000
20	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala d'estar	planta baixa	Petit	3P	Normal	1, 6, 8	1972	>5000
21	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	2 P, 2 F	Normal	4, 1, 5, 9, 10	1850-1900	>5000
22	Olot	Lloc de treball	Privat	Taller	planta baixa	Gran	1 P, 2 F	Alta	1, 5, 10	1960	>5000
23	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala de d'estar	planta baixa	Mitjà	1 P, 2 F	Normal	1, 5, 9, 10	1984	>5000
24	Olot	Lloc de treball	Privat	Botiga	planta baixa	Gran	3P	Alta	1, 6, 9, 11	1988	>5000
25	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Gran	1 P, 3 F	Normal	1, 4, 5, 9, 10	1993	>5000
26	Olot	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Petit	1P	Normal	1, 5, 9, 10	1984	>5000
27	Olot	Lloc de treball	Privat	Magatzem	soterrani	Petit	1P	Molt baixa	4, 5, 7	1750	>5000
28	Olot	Lloc de treball	Privat	Taller	soterrani	Mitjà	1P	Molt baixa	3, 5, 8, 9, 10	1875	>5000
29	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	2P	Baixa	1, 6, 9, 10	1970-1979	>5000
30	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	3, 5, 9, 10	1860	>5000
31	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	1, 5, 9, 10	1970-1975	>5000
32	Olot	Lloc de treball	Públic	Menjador	planta baixa	Mitjà	1 P, 3 F	Molt alta	1, 5, 9, 10	1996	>5000
33	Olot	Lloc de treball	Privat	Magatzem	soterrani	Mitjà	1P	Molt baixa	1, 5	1903	>5000
34	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	3 P, 1 F	Alta	1, 5, 9, 10	1960-1969	>5000

Taula D.1. Les principals característiques dels recintes estudiats, ordenats pel seu codi numèric (*continuació*).

Codi	Poble	Tipus recinte	Propietat	Emplaçament	Nivell	Mida	Obertures	Ventilació	Materials de construcció i revestiment	Any de construcció	Distància a la falla (m)
35	Olot	Habitatge	Privat	Rebost	planta baixa	Mitjà	3 P, 3 F	Alta	4, 5, 8, 9	1754	>5000
36	Olot	Habitatge	Privat	Celler	soterrani	Mitjà	2 P, 3 F	Alta	4, 5	1900	>5000
37	Olot	Lloc de treball	Públic	Taller	semi-soterrani	Gran	3P	Baixa	4, 2, 5, 10	1603-1608	>5000
38	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	1P	Normal	2, 5, 10	1982	>5000
39	Olot	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Mitjà	3 P, 1 F	Normal	3, 4, 5, 9, 10	1900	>5000
40	Olot	Habitatge	Privat	Magatzem	semi-soterrani	Gran	2 P, 1 F	Baixa	1, 5, 9, 10	1900	>5000
41	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 4, 5, 9, 10	1927	>5000
42	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala exposicions	semi-soterrani	Gran	6 P, 2 F	Baixa	1, 4, 5, 10	1870	>5000
43	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	4 P, 4 F	Alta	1, 4, 5, 9	1900-1925	>5000
44	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	1 P, 3 F	Normal	1, 5, 9, 10, 14	1950-1960	>5000
46	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Gran	4P	Normal	1, 5, 9, 10	1979	>5000
47	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Gran	2 P, 3 F	Normal	1, 5, 9, 10	1969	>5000
48	Olot	Habitatge	Privat	Celler	semi-soterrani	Petit	1P	Molt baixa	4	1744-1806	>5000
49	Olot	Lloc de treball	Privat	Laboratori	planta baixa	Mitjà	3P	Alta	3, 5, 9, 10	1700-1800	>5000
50	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Escenari	planta baixa	Gran	5P	Alta	1, 5, 6, 10	1997-1998	385 ± 27
51	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Privat	Oficina	planta baixa	Mitjà	1P	Normal	6, 12	2001	769 ± 27
52	Olot	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	2, 6	1986	>5000
53	Olot	Lloc de treball	Públic	Oficina	planta baixa	Petit	1P	Alta	1, 5	1995	>5000
54	Olot	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Petit	2 P, 1 F	Normal	1, 5, 10	1987	>5000
55	Olot	Lloc de treball	Públic	Magatzem	soterrani	Gran	1P, 2 F	Baixa	4, 5, 7	1880	>5000
56	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Oficina	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Normal	1, 5, 10	1912-1913	659 ± 27
57	St. Feliu de P.	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Baixa	1, 5	1970	1429 ± 27
58	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	semi-soterrani	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 6, 11	1972	>5000
59	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	2 P, 1 F	Normal	1, 5, 6, 10	1964	>5000
60	Olot	Lloc de treball	Públic	Magatzem	semi-soterrani	Petit	1 P, 2 F	Baixa	6	2001	>5000
61	Olot	Lloc de treball	Públic	Taller	planta baixa	Gran	1 P, 2 F	Molt alta	3, 5, 9, 10	1565	>5000
62	Olot	Habitatge	Privat	Celler	semi-soterrani	Gran	2 P, 5 F	Baixa	3, 5, 9, 10	1744-1806	>5000
63	Olot	Lloc de treball	Públic	Sala d'estar	planta baixa	Gran	1P	Alta	6, 12	1988	>5000
64	Olot	Habitatge	Privat	Garatge	planta baixa	Mitjà	2P	Baixa	2, 5, 10	1993	>5000
65	Olot	Lloc de treball	Públic	Arxiu	planta baixa	Petit	1 P, 2 F	Molt baixa	3, 5, 9, 10	1700	>5000

Taula D.1. Les principals característiques dels recintes estudiats, ordenats pel seu codi numèric (*continuació*).

Codi	Poble	Tipus recinte	Propietat	Emplaçament	Nivell	Mida	Obertures	Ventilació	Materials de construcció i revestiment	Any de construcció	Distància a la falla (m)
66	Olot	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Petit	2P	Baixa	3, 5, 9, 10	1700	>5000
67	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 9, 10	2000	>5000
68	Olot	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	1P	Baixa	6, 10	1977	>5000
69	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Sala de lectura	planta baixa	Gran	2 P, 5 F	Normal	3, 4, 5, 9, 10	1986	440 ± 27
70	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Magatzem	planta baixa	Gran	1 P, 10 F	Baixa	1, 5	1970	330 ± 27
71	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	3 P, 8 F	Alta	1, 5, 10	2003	549 ± 27
72	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	2 P, 3 F	Normal	1, 5, 8, 9	1929	495 ± 27
73	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	6, 10	2002	549 ± 27
74	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Privat	Menjador	planta baixa	Gran	1 P, 4 F	Normal	3, 6, 9, 10	1700-1800	440 ± 27
75	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Vestuari	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	3, 5, 10	1731	385 ± 27
76	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Arxiu	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	1, 6, 9, 10	2003	1522 ± 109
77	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Privat	Taller	planta baixa	Gran	4 P, 7 F	Normal	1, 5, 9, 10	1975	440 ± 27
78	Vall d'en Bas	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Mitjà	2P	Alta	3, 5, 9	1700	1087 ± 109
79	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	3 P, 2 F	Normal	3, 5, 9, 10	1920-1930	217 ± 109
80	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	1 P, 3 F	Alta	1, 3, 5, 9, 10	1930	1957 ± 109
81	St. Feliu de P.	Habitatge	Privat	Taller	planta baixa	Mitjà	2P	Alta	1, 3, 4, 9, 10	1900-1910	330 ± 27
82	St. Feliu de P.	Habitatge	Privat	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 3, 9, 10	1700	549 ± 27
83	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 10	1930	824 ± 27
84	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Sala de lectura	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 6, 10	1975-1976	1522 ± 109
85	Olot	Habitatge	Privat	Rebost	planta baixa	Petit	1P	Molt baixa	1, 5, 10	1950-1975	>5000
86	St. Feliu de P.	Lloc de treball	Públic	Sala de màquines	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 9, 10	1996	0 ± 27
87	Amer	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	2 P, 2 F	Normal	3, 5, 7, 10	1800-1850	119 ± 30
88	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Menjador	planta baixa	Gran	3 P, 9 F	Normal	3, 7, 9, 10	1928	217 ± 109
89	Vall d'en Bas	Habitatge	Privat	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	3, 5, 10	1631	652 ± 109
90	Vall d'en Bas	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Gran	1P	Alta	3, 5, 9, 10	1700	1304 ± 109
91	St. Feliu de P.	Habitatge	Privat	Sala d'estar	planta baixa	Petit	2 P, 1 F	Baixa	1, 5, 10	1977	659 ± 27
92	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Privat	Menjador	planta baixa	Mitjà	1P	Normal	1, 5, 6, 10	1975	435 ± 109
93	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Cuina	planta baixa	Mitjà	2 P, 2 F	Alta	3, 9, 10	1909	217 ± 109
94	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	6, 9, 10	2000	2609 ± 109
95	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 9, 10	1978-1979	2174 ± 109

Taula D.1. Les principals característiques dels recintes estudiats, ordenats pel seu codi numèric (*continuació*).

Codi	Poble	Tipus recinte	Propietat	Emplaçament	Nivell	Mida	Obertures	Ventilació	Materials de construcció i revestiment	Any de construcció	Distància a la falla (m)
96	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Mitjà	1 P, 3 F	Alta	3, 9, 10	1930	1739 ± 109
97	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Normal	3, 5, 10	1920-1930	2826 ± 109
98	Vall d'en Bas	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Mitjà	1 P, 2 F	Normal	1, 3, 9, 10	1973	0 ± 109
99	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Sala d'estar	planta baixa	Petit	2 P, 1 F	Baixa	6, 9, 10	1930-1940	870 ± 109
100	Amer	Habitatge	Privat	Sala d'estar	planta baixa	Petit	2 P, 2 F	Normal	3, 5, 10	1770	179 ± 30
101	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Sala d'estar	planta baixa	Gran	1 P, 3 F	Normal	3, 5, 9, 10	1988	2174 ± 109
102	Amer	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Petit	1P	Molt Baixa	6, 10	1972-1974	417 ± 30
103	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Magatzem	soterrani	Petit	1 P, 1 F	Alta	3, 5	1600-1700	2174 ± 109
104	Amer	Lloc de treball	Privat	Taller	planta baixa	Mitjà	2P	Baixa	3, 5, 8	1750	179 ± 30
105	Amer	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	1 P, 1 F	Baixa	3, 5, 10	1400-1500	119 ± 30
106	Amer	Lloc de treball	Privat	Botiga	planta baixa	Mitjà	1P	Normal	1, 3, 5, 10	1821	238 ± 30
107	Planes d'H.	Lloc de treball	Privat	Botiga	planta baixa	Gran	3P	Normal	3, 5, 10	1911	879 ± 27
108	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	1, 5, 10	1965	1209 ± 27
109	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Bodega	soterrani	Mitjà	1 P, 2 F	Alta	1, 5, 10	1984	989 ± 27
110	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Petit	1P	Baixa	1, 5	1600	1264 ± 27
111	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Petit	2 P, 1 F	Normal	1, 5, 10, 13	1950	1099 ± 27
112	Amer	Habitatge	Privat	Rebost	soterrani	Petit	2P	Baixa	6, 9, 10	1966	0 ± 30
113	Planes d'H.	Lloc de treball	Públic	Sala exposicions	semi-soterrani	Gran	1P	Baixa	3, 5, 10	1800-1900	824 ± 27
114	Planes d'H.	Lloc de treball	Públic	Sala de lectura	planta baixa	Mitjà	2 P, 1 F	Normal	3, 5, 9, 10	1918	1099 ± 27
115	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Rebost	planta baixa	Gran	1 P, 1 F	Normal	1, 5	1970	604 ± 27
116	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Rebost	planta baixa	Petit	1P	Normal	1, 5, 10	1980	1758 ± 27
117	Amer	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Mitjà	1P	Normal	14	2000	179 ± 30
118	Amer	Habitatge	Privat	Garatge	planta baixa	Mitjà	2P	Normal	1, 3, 5	1975	238 ± 30
119	Planes d'H.	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Baixa	3, 5, 10	1300-1400	824 ± 27
120	Amer	Lloc de treball	Privat	Sala de reunions	planta baixa	Mitjà	1P	Baixa	12	1972-1974	0 ± 30
121	Amer	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Normal	1, 6, 9, 10	1978-1979	357 ± 30
122	Amer	Lloc de treball	Públic	Arxiu	planta baixa	Mitjà	1P	Baixa	1, 3, 5, 10	1900-1950	476 ± 30
123	Amer	Lloc de treball	Públic	Sala de reunions	planta baixa	Gran	2 P, 2 F	Normal	1, 5, 9, 10	1900-1950	357 ± 30
124	Amer	Lloc de treball	Públic	Despatx	planta baixa	Mitjà	1 P, 3 F	Alta	1, 6, 9, 10	1968	357 ± 30
125	Amer	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Mitjà	3 P, 1 F	Normal	1, 9, 10	1965	0 ± 30

Taula D.1. Les principals característiques dels recintes estudiats, ordenats pel seu codi numèric (*continuació*).

Codi	Poble	Tipus recinte	Propietat	Emplaçament	Nivell	Mida	Obertures	Ventilació	Materials de construcció i revestiment	Any de construcció	Distància a la falla (m)
126	Planes d'H.	Habitatge	Privat	Magatzem	planta baixa	Petit	1P	Baixa	3, 5	1646	824 ± 27
127	Vall d'en Bas	Lloc de treball	Públic	Aula	planta baixa	Gran	1 P, 2 F	Normal	1, 5, 9, 10	1978-1979	2174 ± 109
132	Olot	Lloc de treball	Privat	Despatx	planta baixa	Mitjà	2P	Normal	1, 5	1900-1950	>5000
133	Amer	Habitatge	Privat	Taller	planta baixa	Petit	1 P, 1 F	Alta	3, 5	1800-1900	893 ± 30
134	Amer	Habitatge	Privat	Menjador	planta baixa	Mitjà	2 P, 3 F	Normal	1, 5, 9, 10	1970	60 ± 30

Taula D.2. Resultats de la concentració de radó corresponents a cada període de mesura i el valor mig anual per cadascun dels recintes estudiats a la campanya de mesura 2004-2005.

Codi	Concentració de radó (Bq m ⁻³)				Període llarg (6 ò 9 mesos)	Mitja anual Campanya 2004-2005	Resultat campanya Mai. – Set. 2002
	Períodes curts (3 mesos)						
	1r període Abr. – Jul. 2004	2n període Jul. – Nov. 2004	3r període Nov. 04 - Feb. 05	4rt període Feb. – Jun. 2005			
1	64 ± 12	52 ± 9	44 ± 8	84 ± 12		61 ± 5	
2	117 ± 17	182 ± 19	99 ± 13	101 ± 13		126 ± 8	111 ± 13
3	10 ± 6				31 ± 4	26 ± 3	
4	20 ± 7				25 ± 4	23 ± 3	
5	49 ± 9				42 ± 5	43 ± 4	
6	28 ± 7				34 ± 4	33 ± 4	
7	96 ± 16	115 ± 14	136 ± 16	141 ± 17		122 ± 8	84 ± 11
8	542 ± 50	787 ± 74	846 ± 75	790 ± 73		742 ± 35	
13	67 ± 11	47 ± 8	409 ± 38	292 ± 28		209 ± 13	
14	42 ± 9				47 ± 5	46 ± 5	
15	260 ± 26	266 ± 24	405 ± 38	346 ± 32		319 ± 15	
16	34 ± 9				20 ± 3	24 ± 3	
17	37 ± 10				27 ± 4	29 ± 4	45 ± 8
18	37 ± 10				38 ± 5	38 ± 4	
19	72 ± 13	123 ± 15	114 ± 15	181 ± 20		122 ± 8	77 ± 11
20	11 ± 5				20 ± 3	17 ± 3	
21	131 ± 19	101 ± 13	157 ± 18	102 ± 13		122 ± 8	
22	43 ± 10				46 ± 5	45 ± 5	
23	29 ± 9				29 ± 4	29 ± 4	
24	36 ± 9				31 ± 4	32 ± 4	
25	63 ± 12	85 ± 12	60 ± 10	58 ± 10		67 ± 6	27 ± 5
26	63 ± 13	66 ± 10	81 ± 12	109 ± 14		79 ± 6	
27	40 ± 10	171 ± 18			124 ± 12	116 ± 8	179 ± 18
28	50 ± 11				60 ± 7	58 ± 6	49 ± 8
29	29 ± 9					29 ± 9	
30	259 ± 25	178 ± 19	317 ± 30	295 ± 28		260 ± 13	
31	87 ± 12	104 ± 13	122 ± 15	153 ± 18		116 ± 7	
32	18 ± 5				26 ± 4	24 ± 3	
33	191 ± 19	267 ± 26	31 ± 7	152 ± 17		162 ± 9	
34	62 ± 12	74 ± 11	105 ± 14	83 ± 12		80 ± 6	
35	30 ± 7				32 ± 4	32 ± 4	26 ± 7
36	(107 ± 10)·10 ¹	801 ± 75	28 ± 7	294 ± 28		569 ± 34	619 ± 50
37	27 ± 6				28 ± 4	28 ± 3	23 ± 7
38	86 ± 12	174 ± 18	49 ± 9	111 ± 14		107 ± 7	
39	148 ± 19	153 ± 17	23 ± 6	22 ± 6		90 ± 7	207 ± 19
40	(188 ± 21)·10 ⁻¹	(151 ± 17)·10 ¹	628 ± 58	899 ± 85		1254 ± 74	717 ± 57
41	90 ± 12	58 ± 9	95 ± 13	66 ± 10		77 ± 6	
42	186 ± 23	227 ± 23	171 ± 19	205 ± 22		198 ± 11	266 ± 24
43	50 ± 9				57 ± 6	55 ± 5	
44	425 ± 39	295 ± 27	829 ± 77	697 ± 64		550 ± 27	
46	36 ± 8				37 ± 5	37 ± 4	68 ± 9
47	146 ± 17	204 ± 21	289 ± 28	207 ± 22		211 ± 11	37 ± 8
48	(334 ± 49)·10 ¹	(140 ± 15)·10 ¹	73 ± 11	1023 ± 99		(146 ± 13)·10 ¹	641 ± 51
49	88 ± 15					88 ± 15	
50	24 ± 6	37 ± 7			43 ± 6	37 ± 4	
51	28 ± 7				30 ± 4	30 ± 3	

Taula D.2. Resultats de la concentració de radó corresponents a cada període de mesura i el valor mig anual per cadascun dels recintes estudiats a la campanya de mesura 2004-2005 (*continuació*).

Codi	Concentració de radó (Bq m ³)					Mitja anual Campanya 2004-2005	Resultat campanya Mai. – Set. 2002
	Períodes curts (3 mesos)				Període llarg (6 ò 9 mesos)		
	1r període Abr. – Jul. 2004	2n període Jul. – Nov. 2004	3r període Nov. 04 - Feb. 05	4rt període Feb. – Jun. 2005			
52	98 ± 16	98 ± 13	82 ± 12	70 ± 11		87 ± 6	
53	52 ± 11				67 ± 7	63 ± 6	80 ± 10
54	48 ± 11				32 ± 4	36 ± 4	
55	124 ± 15	186 ± 19	38 ± 8	71 ± 11		108 ± 7	
56	84 ± 12	101 ± 12	91 ± 12	58 ± 10		85 ± 6	
57	38 ± 8				47 ± 5	45 ± 4	
58	36 ± 8				28 ± 4	30 ± 4	
59		95 ± 10	137 ± 16	116 ± 15		110 ± 7	
60	188 ± 20	197 ± 20	161 ± 18	147 ± 17		174 ± 10	
61	138 ± 16	181 ± 19	39 ± 8	54 ± 9		106 ± 7	
62	668 ± 64	697 ± 65	27 ± 7	126 ± 15		390 ± 24	429 ± 34
63	41 ± 10				95 ± 9	82 ± 7	
64	56 ± 9	79 ± 12	18 ± 6	24 ± 6		44 ± 4	
65	201 ± 24	259 ± 25	103 ± 14	155 ± 18		182 ± 11	
66	20 ± 8				23 ± 3	22 ± 3	29 ± 7
67	28 ± 9				28 ± 4	28 ± 4	26 ± 7
68	35 ± 7				65 ± 7	58 ± 5	
69	253 ± 25	311 ± 25	181 ± 19	230 ± 23		247 ± 12	
70	15 ± 5					15 ± 5	
71	58 ± 10	79 ± 10	87 ± 12	110 ± 17		82 ± 6	
72	75 ± 11	141 ± 15	101 ± 13	130 ± 16		114 ± 7	
73	29 ± 7				25 ± 3	26 ± 3	
74	25 ± 6				27 ± 3	27 ± 3	
75	58 ± 10	63 ± 9	20 ± 6	66 ± 10		52 ± 4	
76	23 ± 6				28 ± 4	27 ± 3	
77	36 ± 8				46 ± 5	44 ± 4	
78	23 ± 6				96 ± 9	80 ± 7	
79	107 ± 14	134 ± 15	161 ± 17	131 ± 16		135 ± 8	
80	41 ± 8	39 ± 7			54 ± 7	47 ± 4	
81	20 ± 6				47 ± 5	41 ± 4	
82	78 ± 12	88 ± 11	49 ± 9	80 ± 12		74 ± 5	
83	100 ± 14	133 ± 15	98 ± 13	41 ± 8		96 ± 6	
84	30 ± 7				43 ± 5	40 ± 4	
85	187 ± 24	214 ± 22	113 ± 15	134 ± 16		163 ± 10	211 ± 19
86	19 ± 6				24 ± 3	23 ± 3	
87	28 ± 7				23 ± 3	24 ± 3	
88	57 ± 10	69 ± 10	94 ± 12	75 ± 11		74 ± 5	
89	73 ± 11	82 ± 11	57 ± 9	72 ± 11		72 ± 5	
90	41 ± 8				68 ± 7	62 ± 6	
91	79 ± 12	128 ± 14	75 ± 11	93 ± 13		96 ± 6	
92	13 ± 5				20 ± 3	18 ± 3	
93	39 ± 8				62 ± 6	57 ± 5	
94	18 ± 6				17 ± 3	17 ± 3	
95		17 ± 4			23 ± 4	20 ± 3	
96	92 ± 13			25 ± 6	27 ± 4	41 ± 4	

Taula D.2. Resultats de la concentració de radó corresponents a cada període de mesura i el valor mig anual per cadascun dels recintes estudiats a la campanya de mesura 2004-2005 (*continuació*).

Codi	Concentració de radó (Bq m ⁻³)				Període llarg (6 ò 9 mesos)	Mitja anual Campanya 2004-2005	Resultat campanya Mai. – Set. 2002
	Períodes curts (3 mesos)						
	1r període Abr. – Jul. 2004	2n període Jul. – Nov. 2004	3r període Nov. 04 - Feb. 05	4rt període Feb. – Jun. 2005			
97	172 ± 19	152 ± 16	144 ± 16	196 ± 21		165 ± 9	
98	22 ± 6				18 ± 3	19 ± 3	
99	35 ± 8					35 ± 8	
100	16 ± 6				29 ± 4	26 ± 3	
101	101 ± 14	100 ± 12	92 ± 12	117 ± 15		102 ± 7	
102	54 ± 10				69 ± 7	66 ± 6	
103	38 ± 8				35 ± 4	36 ± 4	
104	16 ± 6				15 ± 3	16 ± 2	
105	58 ± 10	72 ± 10	78 ± 11	100 ± 13		77 ± 6	
106	42 ± 9				59 ± 6	56 ± 5	
107	30 ± 7				30 ± 4	30 ± 3	
108	61 ± 11	68 ± 10	48 ± 8	53 ± 9		58 ± 5	
109	16 ± 6				18 ± 3	18 ± 3	
110	22 ± 6				26 ± 4	25 ± 3	
111	24 ± 7				50 ± 6	45 ± 5	
112	48 ± 9				63 ± 7	60 ± 6	
113	139 ± 17	173 ± 18	91 ± 12	198 ± 21		149 ± 9	
114	71 ± 11	74 ± 10	75 ± 11	73 ± 11		74 ± 5	
115	34 ± 8				43 ± 5	41 ± 4	
116	35 ± 8				32 ± 4	32 ± 4	
117	23 ± 7				21 ± 3	21 ± 3	
118	44 ± 9	91 ± 12	18 ± 5	115 ± 15		66 ± 5	
119	79 ± 12	88 ± 11	51 ± 8	61 ± 10		69 ± 5	
120	38 ± 8				49 ± 5	46 ± 5	
121	26 ± 7				41 ± 5	38 ± 4	
122	27 ± 7				45 ± 5	41 ± 4	
123	120 ± 16	186 ± 19	409 ± 38	211 ± 22		240 ± 13	
124	168 ± 19	272 ± 25	550 ± 39	271 ± 26		327 ± 15	
125	22 ± 7				56 ± 6	49 ± 5	
126	59 ± 10	59 ± 9	30 ± 6	58 ± 10		51 ± 4	
127					19 ± 3	19 ± 3	
132		97 ± 13	25 ± 6	21 ± 6		49 ± 5	
133		59 ± 9	32 ± 7	36 ± 8		43 ± 5	
134		38 ± 7			33 ± 5	35 ± 4	

Taula D.3. Els codi i els resultats anuals dels recintes d'Olot amb els valors de les mitges aritmètica i geomètrica tenint en compte el tipus de sòl i subsòl sobre el que estan construïts.

Codi	C_{Rn} anual (Bq m ⁻³)	Tipus de Sòl (concret)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$	Tipus de sòl (general)	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$	Tipus de Subsòl	$\overline{C_{Rn}}$ (Bq m ⁻³)	$(\overline{C_{Rn}})_g$
1	61 ± 5	Piroclastos	105 ± 29	70 ± 2	Material volcànic	162 ± 46	81 ± 3	Volcànic	161 ± 37	82 ± 3
4	23 ± 3									
5	43 ± 4									
17	29 ± 4									
18	38 ± 4									
24	32 ± 4									
25	67 ± 6									
27	116 ± 8									
28	58 ± 6									
32	24 ± 3									
34	80 ± 6									
36	569 ± 34									
39	90 ± 7									
42	198 ± 11									
47	211 ± 11									
58	30 ± 4									
61	106 ± 7									
85	163 ± 10									
132	49 ± 5									
2	126 ± 8	Colades de lava	212 ± 81	92 ± 3						
3	26 ± 3									
6	33 ± 4									
7	122 ± 8									
26	79 ± 6									
29	29 ± 9									
31	116 ± 7									
33	162 ± 9									
35	32 ± 4									
40	1254 ± 74									
46	37 ± 4									
48	(146 ± 13) · 10 ¹									
52	87 ± 6									
53	63 ± 6									
54	36 ± 4									
59	110 ± 7									
60	174 ± 10									
62	390 ± 24									
63	82 ± 7									
65	182 ± 11									
66	22 ± 3									
67	28 ± 4									
8	742 ± 35	Dipòsits lacustres	170 ± 62	89 ± 3	Sediments del Quaternari	156 ± 54	86 ± 3			
16	24 ± 3									
19	122 ± 8									
20	17 ± 3									
21	122 ± 8									
22	45 ± 5									
23	29 ± 4									
30	260 ± 13									
41	77 ± 6									
43	55 ± 5									
44	550 ± 27									
55	108 ± 7									
68	58 ± 5									
38	107 ± 7	Dip. al·luvials i col·luvials	76 ± 31	-						
64	44 ± 4									
37	28 ± 3	Roca sedimentària			Substrat Terciari			No volcànic	58 ± 30	-
49	88 ± 15									

Taula D.4. Els codi i els resultats anuals dels recintes de La Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles amb els valors de les mitges aritmètica i geomètrica tenint en compte el tipus de sòl i subsòl sobre el que estan construïts.

Codi	C _{Rn} anual (Bq m ⁻³)	Tipus de Sòl (concret)	C _{Rn} (Bq m ⁻³)	(C _{Rn}) _g	Tipus de sòl (general)	C _{Rn} (Bq m ⁻³)	(C _{Rn}) _g	Tipus de Subsòl	C _{Rn} (Bq m ⁻³)	(C _{Rn}) _g
La Vall d'en Bas										
84	40 ± 4	Dipòsits lacustres	36 ± 8	33 ± 2	Sediments del Quaternari	50 ± 8	41 ± 2	No volcànic	56 ± 10	44 ± 2
90	62 ± 6									
94	20 ± 3									
95	41 ± 4									
127	19 ± 3									
76	27 ± 3	Dipòsits al·luvials i coal·luvials	56 ± 11	46 ± 2						
78	80 ± 7									
79	135 ± 8									
80	47 ± 4									
88	74 ± 5									
89	72 ± 5									
93	57 ± 5									
96	17 ± 3									
98	19 ± 3									
99	35 ± 8									
92	18 ± 3	Roca sedimentària			Substrat Terciari	80 ± 33	58 ± 2			
97	165 ± 9									
101	102 ± 7									
103	36 ± 4									
Sant Feliu de Pallarols										
50	37 ± 4	Dipòsits al·luvials i col·luvials			Sediments del Quaternari	67 ± 13	52 ± 2	Volcànic	70 ± 16	54 ± 2
51	30 ± 3									
57	45 ± 4									
69	247 ± 12									
70	15 ± 5									
71	82 ± 6									
72	114 ± 7									
73	26 ± 3									
74	27 ± 3									
75	52 ± 4									
77	44 ± 4									
82	74 ± 5									
83	96 ± 6									
91	96 ± 6									
56	85 ± 6									
81	41 ± 4									
86	23 ± 3									
Les Planes d'Hostoles										
13	209 ± 13	Colades de lava			Material volcànic	72 ± 19	55 ± 2	Volcànic	70 ± 18	55 ± 2
14	46 ± 5									
107	30 ± 3									
108	58 ± 5									
109	18 ± 3									
110	25 ± 3									
111	45 ± 5									
113	149 ± 9									
114	74 ± 5									
119	69 ± 5									
126	51 ± 4	Dipòsits al·luvials i coal·luvials			Sediments del Quaternari	137 ± 91	-	No volcànic	131 ± 94	-
15	319 ± 15									
115	41 ± 4									
116	32 ± 4	Roca sedimentària			Substrat Terciari	32 ± 4	-			

Taula D.5. Els codi i els resultats anuals dels recintes d'Amer amb els valors de les mitges aritmètica i geomètrica tenint en compte el tipus de sòl i subsòl sobre el que estan construïts.

Codi	C_{Rn} anual (Bq m ⁻³)	Tipus de Sòl (concret)	$\overline{C_{Rn}}$ ($\overline{C_{Rn}}_g$) (Bq m ⁻³)	Tipus de sòl (general)	$\overline{C_{Rn}}$ ($\overline{C_{Rn}}_g$) (Bq m ⁻³)	Tipus de Subsòl	$\overline{C_{Rn}}$ ($\overline{C_{Rn}}_g$) (Bq m ⁻³)
87	24 ± 3	Dipòsits al·luvials i coal·luvials		Sediments del Quaternari	75 ± 23	No volcànic	73 ± 20
100	26 ± 3						
104	16 ± 2						
105	77 ± 6						
106	56 ± 5						
112	60 ± 6						
117	21 ± 3						
118	66 ± 5						
120	46 ± 5						
121	38 ± 4						
122	41 ± 4						
123	240 ± 13						
124	327 ± 15						
125	49 ± 5						
134	35 ± 4						
102	66 ± 6	Roca sedimentària		Substrat Terciari	66 ± 6	-	
133	43 ± 5	Roca metamòrfica		Substrat Paleozoic	43 ± 5	-	

Glossari d'acrònims.

CEC	Comissió de les Comunitats Europees.
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear (Espanya).
CTE	Codi Tècnic d'Edificació.
DTN	Detectors Sòlids de Traces Nuclears.
FzK	Forschungszentrum Karlsruhe (d'Alemanya).
ICC	Institut Cartogràfic de Catalunya.
ICRP	Comissió Internacional de Protecció Radiològica.
INTE	L'Institut Nacional de Tècniques Energètiques (Barcelona).
IUPAC	Unió Internacional de Química Pura i Aplicada.
HPA	Health Protection Agency (Regne Unit).
LER	Laboratori d'Estudis del Radó (INTE).
NRPB	National Radiological Protection Board (Regne Unit).
SMC	Servei Meteorològic de Catalunya.
TLD	Detectors de termoluminiscència.
UNSCEAR	Comitè Científic de les Nacions Unides pels Efectes de la Radiació Atòmica.

Referències.

Albarracín, D., 1999. TRANSRAD: un modelo para el transporte del radón del suelo al interior de viviendas en estado estacionario y transitorio. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

Andersen, C.E., 2003. Numerical modelling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results. *Science of the Total Environment* 272, 33-42.

Amgarou, K., 1997. Estimación del factor de Equilibrio a partir de la determinación del grado de desequilibrio del ^{214}Po amb detectors de Makrofol-DE. Treball d'investigació. Universitat Autònoma de Barcelona.

Amgarou, K., 2002. Long-term measurements of indoor radon and its progeny in the presence of thoron using nuclear track detectors: A novel approach. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.

Amgarou, K., Bach, J., Baixeras, C., Font, Ll., 2004. Niveles de radón en la zona volcánica de La Garrotxa. VI Congreso Geológico de España, Zaragoza, 12-15 julio 2004. Publicado en *Geo-Temas* 6, 205-208.

Baixeras, C., García, I., Fernández, F., Domingo, C., Vidal-Quadras, A., Gutierrez, J., 1989. Puesta a punto de un dosímetro pasivo para la medida de radón en el interior de edificios. *Proc. III Congreso de protección radiológica*, 29 Nov-1 Dic de 1989, 655-666.

Baixeras, C., García, I., Fernández, F., Domingo, C., Vidal-Quadras, A., Piesch, E., 1991. Indoor radon concentration measurements in some spanish houses and dwellings with nuclear track detectors. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 19, 279-282.

Baixeras, C., Font, Ll., Fernández, F., Domingo, C., 1995. Estudio del impacto radiológico ambiental del gas radón. XXV Reunión Bienal de la Sociedad Española de Física. Santiago de Compostela, 18-23 de septiembre de 1995.

Baixeras, C., Font, Ll., 1996a. Indoor radon survey in the most populated areas in Spain. *Environment International* 22, Suppl. 1, 671-676.

Baixeras, C., Morán A., 1996b. Determinación de la concentración de radón en el interior de viviendas de Calaf (Barcelona). *Radioprotección. Revista de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Número Extraordinario*.

Baixeras, C., Font, Ll., Fernández, F., Domingo, C., 1996c. Indoor radon levels in a public school and some dwellings from the village of Teià, Catalonia (Spain). *International Congress on Radiation Protection*. April 14-19, Viena.

Baixeras, C., Bacmeister, G.U., Climent, H., Albarracín, D., Enge, W., Freyer, K., Treuler, H.-C., Jönsson, G., Ghose, R., Monnin, M.M., Font, Ll., Devantier, R., Seidel, J.-L., Sciocchetti, G., Cotellessa, G., 1996d. Report on the first phase activity of an EU project concerning coordinated radon measurements in Five european countries. *Environment International* 22, Suppl. 1, 687-697.

- Baixeras, C., Bach, J., Amgarou, K., Moreno, V., Font, Ll., 2005. Radon levels in the volcanic region of La Garrotxa, Spain. *Radiat. Meas.* 40, 509-512.
- Balcázar M., Gonzalez, E., Ortega, M., Flores, J. H., 1993. Geothermal energy prospecting in El Salvador. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 22, Issues 1-4, 273-276.
- Bouassoule, T., Fernández, F., Marin, M., Tomás, M., 1999. A dosimeter based on nuclear etched track detectors for thermal, fast and high energy neutron with flat response. *adiation Protection Dosimetry* 85, 39-43.
- Casas, M., Baixeras, C., Vidal-Quadras, A., Ortega, M., Fernández, F., 1983. Measurement of the relative composition of the cosmic ray iron group with lexan polycarbonate. *Astrophys. Spa. Sci.* 94, 371-381.
- Commission of the European Communities (CEC), 1990. 90/143/EURATOM: Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. D.O.C.E. nº L 080 de 27/03/1990, 0026-0028.
- CSN, 1998. Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes. Colección Otros Documentos 6.1998. CSN.
- Currie, Ll.A., 1999a. Nomenclature in evaluation of analytical methods including detection and quantification capabilities (IUPAC Recommendations 1995). *Analytica Chimica Acta* 391, 105-126.
- Currie, Ll.A., 1999b. Detection and quantification limits: origins and historical overview. *Analytica Chimica Acta* 391, 127-134.
- Domingo, C., Font, J., Baixeras, C., Fernández, F., 1996. Source abundances of ultra heavy elements derived from UHCRE measurements. *Radiation Measurements* 26, 825-832.
- Domingo, C., Font, J., Baixeras, C., Font, Ll., Fernández, F., 1998. Usage of a corrected Bethe-Bloch formula for charge identification of fast ions with $Z \geq 30$ recorded in polycarbonate track detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics* 146, 114-119.
- Domingo, C., Font, Ll., Fernández, F., Baixeras, C., 2003. Identification of non-stopping ions with $Z > 65$ in polycarbonate track detector stacks. *Radiation Measurements* 36, 281-285.
- Fernández, F., Jokic, S., Baixeras, C., Zamani, M., Debeauvais, M., Ralarosy, R., 1986. A comparative estudy of the methods to determine the alpha-particle track density in different SSNTD detectors. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 12, 291-294.
- Fernández-Aldecoa, J.C., Robayna, B., Allende, A., 1992. Natural radiation in Tewnerrife (Canary Islabds). *Radiation Protection Dosimetry* 45, 545-548.
- Font, Ll., 1993. Determinació de la concentració de radó a l'interior d'Edificis amb detectors plàstics de traces. Treball d'investigació. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Font, Ll. 1997. Radon generation, entry and accumulation indoors. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.

Font, Ll., 2002. El gas radón como herramineta para las ciencias de la tierra i el medio ambiente. Ecotropía. <http://www.ecotropia.com>.

García, I., 1990. Puesta a punto de un dosímetro pasivo para la medida de radón en el interior de edificios. Treball de recerca. Universitat Autònoma de Barcelona.

García, M.J., Amgarou, K., Domingo, C., Fernández, F., 2005. Neutron response study of two CR-39 personal doseimeters with air and Nylon converters. *Radiation Measurements* 40, 607-611.

Garcia-Vindas, J.R., Monnin, M. M., 2005. Radon concentration measurements in the presence of water and its consequences for Earth sciences studies. *Radiation Measurements*, Volume 39, Issue 3, Pages 319-322.

Garzón, L., Pérez, J.M., Fernández, M., Fernández, B., López, B.A., Fontán, J., 1986. Lead concentrations and source strength in the atmosphere of an urban site. *Atmospheric environment* 20, 1441-1446.

Ghose, D., Paul, D., Sastri, R. C., 2003. Radon as a tracer for helium exploration in geothermal areas. *Radiation Measurements*, Volume 36, Issues 1-6, 375-377.

González, C., Garzón, L., 1978. Utilización del radón atmosférico en la determinación de la estabilidad vertical de la baja atmósfera en un núcleo urbano. Influencia de los regímenes de viento en el contenido de radón. *Anales de Física de la Real Sociedad Española de Física y Química* 74, 1.

Goula, X., Olivera, C., Escuer, J., Fleta, J. Grellet, B., Bousquet, J.C., 1990. Neotectonics and seismicity in the area of the seismic crisis of 1427-1428 in Catalonia. *Proceedings in the XII General Assembly of the European Seismological Commission*, Barcelona.

Guérin, G., Benhamou, G., Mallarach, J.M., 1986. Un exemple de fusió parcial en medi continental. El vulcanisme quaternari de Catalunya. *Vitrina*; 1, 20-26.

Harley, N.H., Terilli, T.B., 1990. Predicting anual average indoor ^{222}Rn concentration. *Health Physics* 59, 205-209.

ICC 1997. Mapa geològic de Catalunya 1:25000, Amer 295-1-2. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya.

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., et al., 1995. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science* 269, 60-61.

Immè, G., La Delfa, S., Lo Nigro, S., Morelli, D., Patanè, G., 2006. Soil radon monitoring in the NE flank of Mt. Etna (Sicily). *Applied Radiation and Isotops* 64, 624-629.

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1987. Lung cancer risk from indoor exposures to radon dauhters. *Annals of the ICRP* 50. Pergamon. Oxford.

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1991. Recomendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP* 60. Pergamon. Oxford.

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1994a. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Annals of the ICRP 65. Pergamon. Oxford.

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1994b. Human respiratory tract model for radiological protection . Annals of the ICRP 66. Pergamon. Oxford.

Ioannides, K., Papachristodoulou, C., Stamoulis, K., Karamanis, D., Pavlides, S., Chatzipetros, A., Karakala, E., 2003. Soil gas radon: a tool for exploring active faults zones. Applied Radiation and Isotops 59, 205-213.

Jönsson, G., 2002. Personal communication.

Khan, H.A., Qureshi, A.A., Brant, R., 1991. Mineral exploration based on radon measurements. G. Furlan, L. Tommasino (eds.). Proc. 2nd Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental and/or Earth Sciences, Trieste, World Scientific, Singapore, 472-485.

KATRIN, 1998. The Katrin Project, Final report on the research project supported by contract ERB-CHRX-CT94-0567, "A multi-disciplinary global approach of groundwater flows in karstic areas and its consequences for water resources and environment studies".

Kávási, N., Kovács, T., Németh, C., Szabó, T. Gorjánác, Z., Várhegyi, A., Hakl, J., Somlai, J., 2006. Difficulties in radon measurements at workplaces. Radiation Measurements 41, 229-234.

Kullab, M.K., Al-Bataina, B.A., Ismail, A.M., Abumurad, K.M., 2001. Seasonal variation of radon-222 concentrations in specific locations in Jordan. Radiation Measurements 34, 361-364.

Mallarach, J.M., 1998. El vulcanisme Prehistòric de Catalunya. Edita Diputació de Girona, 322 pàgines, Olot.

Martín Matarranz, J. L., 2004. Concentración de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural. Colección Informes Técnicos 13.2004. CSN.

Miles, J.C.H., 2001. Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies. Radiation Protection Dosimetry 93, 369-376.

Monnin, M. M., Seidel, J. L., 1992. Radon in soil-air and in groundwater related to major geophysical events: A survey. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 314, Issue 2, 316-330.

Monnin, M. M., Seidel, J. L., 1998. An automatic radon probe for earth science studies. Journal of Applied Geophysics 39, 209-220.

Morin, J-P., Baixeras, C., Gourcy, L., Ramoneda, J., Freixes, A., Manolopoulou, M., Meus, P., Seidel, J-L., Seidel, J-L., Corbin, J C., 1999. Radon measurement in karstic waters with Lucas cell technique. Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica . Sect . C, 22, 3-4.

Mulligan, A. E., Charette, M. A., 2006. Intercomparison of submarine groundwater discharge estimates from a sandy unconfined aquifer. Journal of Hydrology, Volume 327, Issues 3-4, 411-425.

Nazaroff, W. W., Nero, A. V., 1988. Radon and its decay products in indoor air. John Wiley and sons, ISBN 0-471-62810-7, New York.

Pinza Molina, C., Domínguez Bello, M.J., Hernández-Armas, J., 1995. Radón en las viviendas de la isla de Lanzarote. X Congreso Nacional de Física Médica. Salamanca 1995.

Pinza Molina, C., Hernández-Armas, J., 1996. Radón en viviendas de Gran Canaria. Radioprotección. Revista de la Sociedad de Protección Radiológica. Número Extraordinario 1996.

Porstendörfer, J., 1994. Properties and Behaviour of radon and thoton and their decay products in the air. J. Aerosol Sci., Tutorial/Review Paper, Vol.25 n°2, 219-263.

Quindós, L. S., Soto, J., Fernández, P. L., 1991. Medidas de la concentracions de radón en el interior de viviendas españolas. Revista Espanyola de Física, 1.

Real Decreto 783/2001, 2001. Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE 178, 27284-27393.

Saula, E., Picart, J., Mató, E., Llenas, M., Lozanitos, M., Berastegui, X., Agustí, J., 1996. Evolución geodinámica de la fosa del Empordá y las Sierras transversales. Acta Geológica Hispánica; 29 (2-4), 55-75.

Segovia, N., Armienta, M.A. Valdes, C., Mena, M., Seidel, J.L., Monnin, M., Peña, P., Lopez, M.B.E., Reyes, A.V., 2003. Volcanic monitoring for radon and chemical species in the soil and in sring water samples. Radiation Measurements 36, 379-383.

SILENA, 1992. PRASSI Portable Radon Gas Surveyor Mod.5S. Manual de funcionament. Silena S.p.A. Società Industriale per l'Elettronica avanzata, Cernusco, Italia.

Singh M., Singh, N. P., Singh S., Virk, H. S., 1986. Radon survey for uranium prospection using alpha detectors. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements12, 879-882.

Soavi, R., 1994. Measurement of radium and radon in water and soil with the Silena PRASSI Monitor. SILENA Application Note.

Stidley, C.A., FAMET, J.M., 1993. A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon. Heath Physics 65, 234-251.

Suárez Mahou, E., Fernández Amigot, J. A., 2000. Proyecto MARNA mapa de radiación gamma natural. Colección Informes Técnicos 5, CSN.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation, vol. I, Sources. United Nations Publications, New York.

Urban, M., 1986. Pasive one-element track etch dosemeter for simultaneous measurements of Radon, Thoron and decay products in air. Nuclear Track 12, 685-688.

Vargas, A., Ortega, X., Martín, J. L., 2004. Calidad metrológica y dosimetría del radón. Primera campaña nacional de intercomparación. Colección Documentos I+D 12.2004. CSN.

Vargas, A., Ortega, X., Martín, J. L., 2005a. Resultados de la intercomparación de sistemas de medida en continuo de la concentración de radón. CSN_torón _05.

Vargas, A., Ortega, X., Martín, J. L., 2005b. Resultados de la intercomparación de sistemas de medida integradores de la concentración de radón. CSN_torón _07.